

Cd Zn 交互作用对金针菇富集重金属的影响

贾彦, 杨勇, 江荣风, 李花粉, 王巍

(中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 农业部植物营养与养分循环重点实验室, 北京 100193)

摘要:以金针菇为试验材料,在基质中分别单独添加和同时添加不同浓度的 Cd、Zn,采用栽培袋接种培养法研究了食用菌富集 Cd、Zn 以及 Cd、Zn 交互作用对食用菌累积重金属的影响。结果表明,低浓度的 Cd($<1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Zn($<600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)能够促进金针菇的生长,但是高浓度的 Cd、Zn 对金针菇生长会产生抑制作用。随着栽培基质中 Cd、Zn 处理浓度的增高,金针菇子实体中的 Cd、Zn 浓度也随之增加。Cd-Zn 之间表现为互相拮抗作用,金针菇子实体内的 Cd 含量随着培养基中 Zn 浓度的增加而显著降低($P<0.05$),Cd 浓度降低比例与 Zn/Cd 比值之间呈显著的正相关($P<0.01$)。在 Zn 处理浓度为 $600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd 处理浓度分别为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 10 时,与不加 Zn 相比,金针菇子实体 Cd 含量分别降低 29%和 11%。Cd 对 Zn 也表现出一定的拮抗作用,但是除在 Zn 为 0 和 Cd 为 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时拮抗作用显著($P<0.05$)外,其余处理没有达到显著水平。而在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 和 $600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn 处理条件下,金针菇生物量显著下降,可能是由于 Cd-Zn 协同作用,造成毒害作用的结果。

关键词:食用菌; 镉; 镉; 拮抗作用

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)07-1368-06

Effects of Interactions Between Cd and Zn on Accumulation of Heavy Metals in the *Flammulina velutipes*

JIA Yan, YANG Yong, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen, WANG Wei

(Key Laboratory of Plant Nutrition of Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Plant-Soil Interactions of Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The edible fungi have been a very popular delicacy especially in China and some central European countries because they are a good source of carbohydrate, protein, fats, and minerals. However the edible fungi can also accumulate heavy metals from the environment. A substrate cultivating experiment was conducted to study the effect of Cd, Zn, and their interaction on the accumulation of heavy metals in the *Flammulina velutipes*. The results showed that the yield of *Flammulina velutipes* was improved at lower doses of Cd ($<1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) or Zn ($<600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) treatments, followed by inhibition at higher doses. Cd or Zn concentrations increased gradually with the increasing levels of Cd or Zn in the cultivation substrate. Cd-Zn antagonism was observed when Cd and Zn were supplied together, Cd concentrations in *Flammulina velutipes* were reduced significantly as increasing concentration of Zn in the cultivation substrate ($P<0.05$). In addition, the percentage of decreased Cd concentrations increased linearly with the increasing ratio of Zn and Cd ($P<0.01$). At the Zn level of $600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd concentrations in *Flammulina velutipes* decreased by 29% and 11% for the Cd level of $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, compared with no Zn addition. Furthermore we also founded that Zn concentrations in *Flammulina velutipes* were reduced as increasing concentration of Cd in the cultivation substrate. However, there was no significant difference with the exception of 0 Zn $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 10 Cd $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ treatment. The yield of *Flammulina velutipes* was inhibited at $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd and $600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Zn treatment, which maybe the toxicity of Cd-Zn synergistic action.

Keywords: edible fungi; Zn; Cd; antagonism

食用菌由于含有人体必需的各种氨基酸,富含蛋白质、真菌多糖、微量元素等众多生理活性物质^[1],备受人们青睐,已成为人类重要的食物来源。但应该引

起重视的是,食用菌在富集必需的、有益元素的同时,也会吸收一些有害的重金属元素^[2-3],不仅会影响自身的生长,而且会通过食物链进入人体,引发食品安全问题,危害人类健康。一些研究表明,许多食用菌都具有富集重金属 Cd 的特性。张丹等对采集于四川凉山州的 9 种野生蘑菇及相关土壤的重金属 Cd、Pb、Zn、Hg、As 含量进行的测定结果显示,野生蘑菇对 Cd 有很强的积累能力,在土壤中没有 Cd 检出的情况下,

收稿日期:2008-10-01

基金项目:农业部 948 重大国际合作项目(2003-Z53)- 养分资源综合管理

作者简介:贾彦(1982—),女,硕士研究生,主要从事环境污染生态方面的研究工作。

通讯作者:李花粉 E-mail:lihuafe@cau.edu.cn

蘑菇体中均测出了 Cd^[4]。李开本等的研究表明,人工栽培的巴西蘑菇子实体中 Cd 含量普遍较高,达到 13.0~23.1 mg·kg⁻¹,严重影响了其食用的安全性^[5]。Michelot 等检测了巴黎地区 92 种食用菌样品的重金属含量发现,大部分食用菌中 Cd 的平均含量为 5.4 mg·kg⁻¹,而在野生蘑菇(*Agaricus arvensis*)中,Cd 的最大含量可达到 101 mg·kg⁻¹[6]。

在自然界中,微量元素并不是单独存在的,而且在微量元素之间存在着相互制约的现象,影响着生物对它们的吸收利用^[7]。在众多微量元素中,由于 Zn 与 Cd 具有相同的核外电子构型,化学性质极为相似,而且往往相伴生,存在着复杂的交互作用^[8]。关于 Cd-Zn 交互作用的植物效应已经有了比较深入的研究,结果表明 Cd-Zn 的交互作用既有协同的一面^[9],也有拮抗的一面^[10],表现哪方面的作用因土壤性质、Zn 的背景值、植物品种以及环境条件不同而异^[11]。

目前,关于重金属交互作用对食用菌吸收重金属的研究较少。袁瑞奇等^[12]曾研究了平菇对重金属的富集机理,发现 Zn、Cu、Pb、Cd 既存在拮抗作用,也存在协同作用。因此,研究 Cd、Zn 的交互作用对食用菌吸收重金属的影响是非常必要的。本研究以金针菇为供试食用菌品种,通过向栽培基质中单独添加 Zn 或 Cd、以及同时添加 Cd、Zn,研究金针菇对 Cd 和 Zn 的吸收富集状况以及 Cd、Zn 之间的交互作用,为食用菌重金属污染防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试金针菇(*Flammulina velutipes*),品种为金杂-19,菌种来自中国农业大学生物学院食用菌教研室。培养料配方为棉籽壳 78%,麦麸 20%,石灰 1%,蔗糖 1%,培养料中 Cd、Zn 含量分别为 0.03 和 40 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

菌种扩繁:将配制好的马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)液体培养基 150 mL 转移到 500 mL 三角瓶中,于高压蒸汽灭菌锅中灭菌。冷却后,于超净台上接入供试菌种。将接种后的三角瓶置于摇床,在 25℃、170 r·min⁻¹下恒温培养 7 d,得到大小均一的菌丝球。

培养料装袋:把培养料装入高压聚丙烯塑料袋,每袋装料 400 g,其中干料 180 g,加水 220 mL 左右,料水比约为 1:1.2。Cd 单因素处理设计 6 个浓度梯度:0、0.5、1、3、10、50 mg·kg⁻¹;Zn 单因素处理设计 6 个浓度梯度:0、200、400、600、800、1 000 mg·kg⁻¹;在

Cd 添加浓度为 1、10 mg·kg⁻¹ 处理时,添加锌的浓度为 200、400、600 mg·kg⁻¹。事先配好 CdSO₄ 和 ZnSO₄ 母液,量取各个处理所需的体积,随水均匀施入培养料中。每个处理设 3 个重复,将处理后的袋料在 126℃下灭菌 2 h,待冷却后接入扩繁的菌种。为了减小试验误差,接种时采用定量接种的方式,每个栽培袋接入等体积的菌种。

出菇:接种后的菌袋放置在发菌室内培养 30~40 d,待菌丝长透后搬到出菇房开袋出菇。出菇时定期察看,定期调换菌袋位置,减小外界条件对金针菇产量的影响,15 d 后收获样品。

1.3 样品制备

金针菇收获后,去除金针菇上残留的培养料等杂质,用自来水冲洗干净后用去离子水清洗 3 遍,吸干水分后称量鲜重,打浆,待用。

1.4 样品中 Cd 和 Zn 的测定

样品用 HNO₃-HClO₄ 消化,原子吸收-石墨炉法测定 Cd、Zn 的含量^[13]。

1.5 数据分析方法

采用 SPSS 统计软件进行显著性检验和相关性分析。

2 结果分析与讨论

2.1 施 Cd、Zn 对金针菇产量的影响

在金针菇栽培基质中分别添加不同浓度的 Cd 或 Zn,测定其生物量鲜重,结果见表 1。

当 Cd 或 Zn 添加浓度分别低于 1 mg·kg⁻¹ 和 600 mg·kg⁻¹ 时,随着添加浓度的升高,金针菇的生物量也随之有所增加,且生物量的最大值分别是对照的 1.15 倍和 1.17 倍,经检验生物量增加达到显著水平 ($P < 0.05$)。随着 Cd、Zn 添加浓度的进一步提高,其生物量呈降低趋势,当 Cd 达到 50 mg·kg⁻¹ 时,与对照相比金针菇生物量显著下降。当 Zn 浓度达到 1 000 mg·kg⁻¹ 时,尽管其生物量有所下降,但是差异不显著。

在 Cd 添加浓度为 1、10 mg·kg⁻¹ 时分别进行不同浓度的加 Zn 处理,测定其生物量鲜重。结果表明(表 2),在添加 1 mg·kg⁻¹ Cd 的条件下,施 Zn 与单独加 Cd 相比,生物量并没有显著变化,而与不加 Cd、Zn 处理的对照相比,生物量有所增加。当 Cd 浓度为 10 mg·kg⁻¹,同时添加 Zn 浓度达到 600 mg·kg⁻¹ 时,金针菇生物量显著下降,且低于不加 Cd、Zn 处理的对照生物量。这可能是由于 Zn-Cd 协同作用所造成毒害作用的结果。徐勤松等^[14]报道,加入锌使镉处理下水车前

植株体内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 3 种防御酶的活性降低, 且随着锌处理浓度的增加, 差异显著性增强。表明 Zn 增强了 Cd 的毒害作用, 显示出协同作用的趋势。

表 1 Cd、Zn 单独处理对金针菇产量的影响 ($\text{g} \cdot \text{袋}^{-1}$ 鲜重)

Table 1 Effects of different Cd or Zn treatments on the yield of *Flammulina velutipes* ($\text{g} \cdot \text{bag}^{-1}$ Fresh Weight)

重金属 Heavy metal	处理 Treatment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均产量 Average product/g
Cd	CK	84.6 $\pm$ 3.1 b
	0.5	90.2 $\pm$ 2.3 b
	1	97.4 $\pm$ 5.2 a
	3	86.6 $\pm$ 5.6 b
	10	88.7 $\pm$ 2.1 b
	50	73.6 $\pm$ 3.4 c
Zn	CK	84.6 $\pm$ 3.1 c
	200	92.3 $\pm$ 2.7 b
	400	100.9 $\pm$ 4.9 a
	600	107.3 $\pm$ 5.3 a
	800	102.9 $\pm$ 4.7 a
	1 000	77.5 $\pm$ 4.0 c

注: 表中的数据为均值 $\pm$ 3 个重复的标准差; 同一列中相同字母代表没有显著差异 ($P < 0.05$), 下表同。

Note: Data in table are average $\pm$ SD of three replicates. Within each column, values followed by the same letter are not significantly different at the 5% level. The same below.

表 2 Cd、Zn 同时处理对金针菇产量的影响 ($\text{g} \cdot \text{袋}^{-1}$ 鲜重)

Table 2 Effects of applied Cd and Zn on the yield of *Flammulina velutipes* ($\text{g} \cdot \text{bag}^{-1}$ Fresh Weight)

处理 Treatment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		平均产量 Average product/g
Cd	Zn	
1	0	97.4 $\pm$ 5.2 a
	200	98.5 $\pm$ 4.6 a
	400	96.3 $\pm$ 3.9 a
	600	93.8 $\pm$ 4.1 a
	10	88.7 $\pm$ 2.1 a
10	0	88.7 $\pm$ 2.1 a
	200	87.0 $\pm$ 2.9 a
	400	82.5 $\pm$ 3.8 a
	600	68.9 $\pm$ 5.6 b

虽然 Cd 是对生物体有毒害作用的元素, 但是本试验结果表明, 低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度的 Cd 对金针菇的生长具有促进作用。曲明清等^[15]研究了培养料中重金属对真姬菇产品质量安全的影响, 其结果表明, 当培养料中 Cd 添加浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 真姬菇的生物学效率随培养料 Cd 处理浓度的增大而提高; 袁瑞奇

等研究平菇对重金属的富集机理时也得到了类似的结果^[12]。杨春香等研究了 Cd 对姬松茸菌丝生长的影响, 结果表明在处理浓度小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低 Cd 浓度下, 姬松茸基因型 A17、A18 的生长速度有所提高, 但同时出现扭结缓慢、数量减少等毒害作用^[16]。低浓度的 Cd 对生物体的促进作用, 可能是由于低浓度的 Cd 能够提高生物体内过氧化氢酶、过氧化物酶和酸性磷酸酶等的活性的或者通过加速生物体内的某些生理生化反应来达到促进其生长的目的^[17]。

尽管 Zn 是生物体生长所需的必需元素, 但是高浓度的 Zn 处理仍然会对食用菌的生长产生抑制作用。金萍^[18]在添加锌对茶薪菇的富 Zn 的影响试验中发现, 将不同浓度的可溶 Zn 盐 (ZnSO_4) 添加到液体培养基中进行茶薪菇的深层发酵, Zn 离子浓度在 $0.1 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 菌丝体干重和富 Zn 量随着添加 Zn 量的增加而呈上升趋势, 但添加 Zn 的量大于 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 菌丝体的生长受到一定程度的抑制作用。其他试验结果同样表明高浓度的 Zn 对金针菇^[19]和草菇^[20]的生长产生了抑制作用。

2.2 单独添加 Cd、Zn 对金针菇 Cd、Zn 含量的影响

由于 Cd、Zn 添加浓度分别为 50 和 $1 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 金针菇的生长明显受到了抑制, 产生了毒害作用, 已经不能真正反映金针菇对这两种金属离子的吸收情况, 所以回归分析不包括这两个处理。

测定结果表明, 随着栽培基质中 Cd 浓度的增加, 金针菇体内的 Cd 含量也随之增加 (图 1), 最高可以达到 $4.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是国家绿色食品标准中要求限值的 25 倍, 而不加 Cd 处理时仅为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同时 Cd 处理浓度较低时, 金针菇 Cd 含量增加趋势较为明显, 当处理浓度达到 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上后, 子实体中 Cd 含量的增加趋于平缓, 但是仍保持增加趋势。金针菇的吸 Cd 总量 (子实体中 Cd 含量和子实体鲜重的乘积) 的变化趋势与其体内 Cd 浓度的变化趋势基本相似 (图 1)。

子实体中 Zn 的测定结果也表明, 随着栽培基质中 Zn 浓度的增加, 金针菇体内的 Zn 含量也随之增加 (图 2), 最高可以达到 $91.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而不加 Zn 处理时仅为 $14.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同样, 金针菇的吸 Zn 总量的变化趋势与其体内 Zn 浓度的变化趋势相似 (图 2)。

雷敬敷等研究了香菇、双孢蘑菇、凤尾菇和木耳对 Cd、Zn、Cu、Pb 的累积效应, 结果表明, 在试验的重金属添加范围内, 香菇等食用菌对重金属的吸收量随重金属在栽培基质中的添加量的增加而增加, 但是它

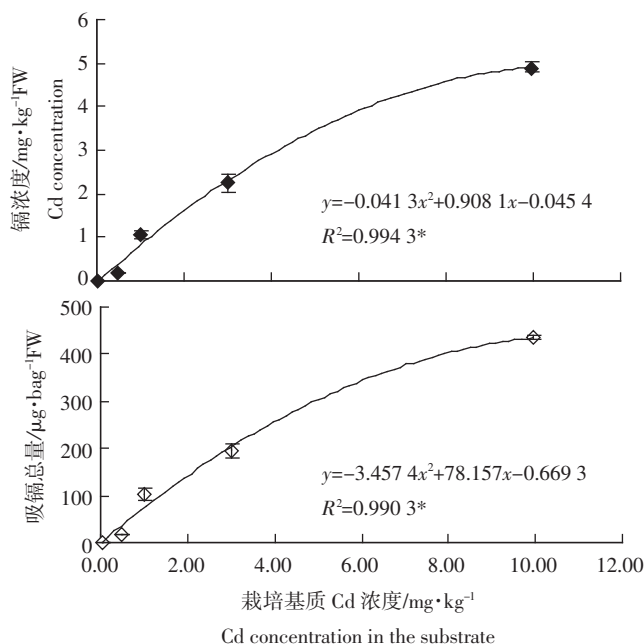


图 1 不同镉浓度下金针菇体内镉浓度、吸镉总量的变化趋势

Figure 1 The changes of cadmium concentration and total cadmium amount in fruit body under various Cd supply

们之间绝大多数都不呈直线关系,而是呈“S”型的曲线关系。经过数理统计,建立了 Logistic 模型,该模型说明当培养料中添加的重金属量不断增加时,食用菌对重金属的累积速率经历着一个由低到高,再由高到低的过程^[21]。徐丽红等研究了香菇对栽培基质中有害重金属的吸收规律,结果发现香菇对栽培基质中 Cd 的吸收富集规律用曲线拟合后,属于幂指数型曲线,在 Cd 浓度达到对香菇产生毒害而导致其不能生长的阈值前,香菇中的 Cd 含量随栽培基质中 Cd 含量的增加呈指数增长^[22]。这些研究结果之间的差异可能是食用菌品种的不同及试验条件的差异而造成的。

金针菇中 Cd、Zn 含量随其栽培基质中的含量的升高而升高,虽然升高的速率有所差异,但是总体变化趋势差异不大。因此,在实际的生产中应该严格控制栽培基质中有害元素 Cd 含量,生产无公害的食用菌;同时可以根据栽培基质和食用菌的自身特性,在栽培基质中添加一定量的有益元素 Zn,生产高营养附加值的产品。

2.3 Cd、Zn 相互作用对金针菇 Cd、Zn 含量的影响

在 Cd 添加浓度为 1 和 10 mg·kg⁻¹ 时分别进行不同浓度的加 Zn 处理,金针菇体内 Cd 含量随着添加 Zn 浓度的增加而显著降低 ($P < 0.05$),均在 Zn 添加浓度为 600 mg·kg⁻¹ 时达到最低值(表 3)。但是在不同 Cd 浓度下(1 和 10 mg·kg⁻¹),添加 Zn 对金针菇 Cd 含

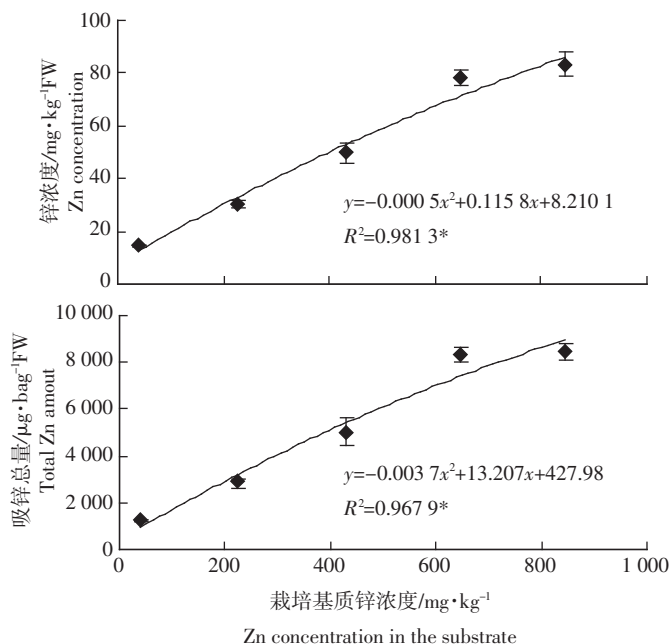


图 2 不同锌浓度下金针菇体内锌浓度、吸锌总量的变化趋势

Figure 2 The changes of zinc concentration and total zinc amount in fruit body under various Zn supply

量降低程度存在差异。与不加 Zn 相比,Cd 处理浓度为 1 mg·kg⁻¹ 时金针菇子实体 Cd 浓度降低比例明显高于 10 mg·kg⁻¹ 的 Cd 处理(表 3)。Cd 处理浓度为 1 和 10 mg·kg⁻¹ 时,子实体 Cd 浓度平均降低了 19% 和 7%。金针菇子实体 Cd 浓度降低比例与 Zn/Cd 比值之间呈显著的正相关 ($P < 0.01$)。

在 Cd 处理浓度相同的情况下增加栽培基质中的 Zn 含量,子实体内的 Zn 含量都随着栽培基质中 Zn 含量的增加而增加(表 4)。在基质中 Zn 含量一定的情况下,与不加 Cd 相比较,1 和 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理情况下,子实体中的 Zn 含量有所下降,但只有在不加 Zn 且 Cd 处理浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时差异显著 ($P < 0.05$) 外,其余处理差异均不显著。

Zn 与 Cd 的交互作用在土壤-植物系统中金属复合污染领域内研究较多,已经比较系统和完善。总体来说,Zn 与 Cd 的交互作用因植物种类、组织部位、Cd 与 Zn 的浓度差异从而表现为拮抗和协同两个方面。如 Oliver 等在澳大利亚南部的临界缺 Zn 和严重缺 Zn 的土壤中施加 Zn 肥,生长的小麦籽粒中 Cd 的质量分数比未施 Zn 的降低了约 50%,表现为 Zn 可以抑制作物对 Cd 的吸收^[23]。周启星等同时对两种作物的研究发现,在相同的土壤及 Cd、Zn 质量分数条件下,在玉米子粒中 Cd-Zn 表现为抑制作用,而在大豆子粒中则表现为协同作用^[24]。华路的研究表明,Zn、Cd

表 3 锌对金针菇体内镉浓度的影响

Table 3 Effect of applied zinc on cadmium concentration in fruit body

处理 Treatment/mg·kg ⁻¹		子实体镉含量 Cd content in the fruit body/mg·kg ⁻¹	锌镉比 Ratio of Zn and Cd	Cd 降低比例/% Percentage of decreased Cd
Cd	Zn			
1	0	1.05±0.08 a		
	200	0.92±0.09 ab	200	12
	400	0.88±0.06 ab	400	16
	600	0.75±0.07 b	600	29
10	0	4.91±0.11 a		
	200	4.78±0.14 ab	20	3
	400	4.60±0.03 b	40	6
	600	4.36±0.16 c	60	11
相关性分析		N=6	r=0.951 9 (P=0.003 4<0.01)	

注: N 为样本数, r 为相关系数, P 为概率。

Note: N, r, P in the table represent numbers of samples, correlation coefficient, and probability, respectively.

表 4 镉对金针菇体内锌浓度的影响

Table 4 Effect of applied cadmium on zinc concentration in fruit body

处理 Treatment/mg·kg ⁻¹		子实体锌含量 Zn content in the fruit body/mg·kg ⁻¹
Zn	Cd	
0	0	14.6±0.4 a
	1	12.6±1.7 a
	10	10.1±0.9 b
200	0	30.5±1.5 a
	1	27.3±3.5 a
	10	27.0±3.0 a
400	0	49.8±4.0 a
	1	49.7±3.5 a
	10	47.4±3.1 a
600	0	77.6±1.9 a
	1	77.0±3.5 a
	10	71.8±2.2 a

对小麦子粒中 Cd 含量影响的交互效应与土壤中 Zn/Cd 比值及浓度密切相关, Zn/Cd 较大时, Zn 对 Cd 有拮抗效应; Zn/Cd 较小时, Zn 对 Cd 有协同效应^[25]。

目前, 关于 Cd、Zn 交互作用对食用菌吸收重金属的研究较少。袁瑞奇等^[12]研究结果表明, 在 Cd 存在的情况下, 菌盖对 Zn 的吸收表现为拮抗作用, 而菌柄吸收量有所增加。在 Zn 存在的情况下, 平菇对 Cd 的吸收则表现为协同作用。在本试验中, Zn 对 Cd 的吸收表现为较显著的拮抗作用, 而且拮抗作用的强弱与 Zn/Cd 比呈显著的正相关 ($P<0.01$); 当 Zn 处理浓度

为 0 (培养料中 Zn 背景含量为 40 mg·kg⁻¹), Cd 处理浓度为 10 mg·kg⁻¹ 时, Cd 对 Zn 也表现出一定的拮抗作用, 但是其余处理没有达到显著水平。可能是由于 Zn 与 Cd 具有相同的核外电子结构, 具有相似的化学性质, 可以相互取代、竞争, 如 Cd 进入细胞后会与 Zn 竞争酶的结合位点, 取代 Zn。但是当大量的 Zn 存在的时候, Cd 的竞争能力会被削弱, 吸收相应减少^[8]。

3 结论

低浓度的 Cd 和 Zn 能够促进金针菇的生长, 使其生物量有所增加, 但是高浓度的 Cd、Zn 对金针菇生长会产生抑制作用, 使其生物量下降; 随着栽培基质中 Cd 或 Zn 处理浓度的增高, 金针菇子实体中的 Cd 或 Zn 含量也随之增加; Cd-Zn 之间的交互作用, 对金针菇子实体吸收重金属的影响, 在本试验中体现为互相拮抗, Zn 的添加可以降低金针菇中 Cd 的含量; 而在 10 mg Cd·kg⁻¹ 和 600 mg Zn·kg⁻¹ 处理条件下, 金针菇生物量显著下降, 可能是由于 Cd-Zn 协同作用, 造成毒害作用的结果。

参考文献:

- [1] Latiff L A, Daran A B M, Mohamed A B. Relative distribution of minerals in the pileus and stalk of some selected edible mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 1996, 56(2): 115-121.
- [2] Mendil D, Uluözlü D, Hasdemir E, et al. Determination of trace elements on some wild edible mushroom samples from Kastamonu, Turkey[J]. *Food Chemistry*, 2004, 88(2): 281-285.
- [3] Svoboda L, Havlíčková B, Kalač P. Contents of cadmium, mercury and lead in edible mushrooms growing in a historical silver-mining area[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(4): 580-585.
- [4] 张 丹, 高健伟, 郑有良, 等. 四川凉山州 9 种野生蘑菇的重金属含量[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(3): 348-351.
ZHANG Dan, GAO Jian-wei, ZHENG You-liang, et al. Heavy metal content of 9 wild mushrooms growing in Liangshan, Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 12(3): 348-351.
- [5] 李开本, 陈体强, 徐 洁, 等. 巴西蘑菇富镉特性研究初报[J]. *食用菌学报*, 1999, 6(1): 55-57.
LI Kai-ben, CHEN Ti-qiang, XU Jie, et al. A primary study on the Cd-enrichment characteristics of *Agaricus blazei* Murrill[J]. *Acta Edulis Fungi*, 1999, 6(1): 55-57.
- [6] Michelot D, Siobud E, Doré J C, et al. Update on metal content profile in mushrooms toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation[J]. *Toxicol*, 1998, 36(12): 1997-2012.
- [7] Wu F B, Zhang G P, Yu J S. Interaction of cadmium and four microelements for uptake and translocation in different barley genotypes[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(14): 2003-2020.

- [8] 李森林, 王焕校, 吴玉树. 凤眼莲中锌对镉的拮抗作用 [J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 249-254.
- LI Sen-lin, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Antagonistic effects of zinc on cadmium in waterhyacinth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(2): 249-254.
- [9] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. *the Science of the Total Environment*, 2002, 285: 187-195.
- [10] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and the up-take of cadmium and other elements by durum wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17: 1839-1858.
- [11] 艾伦弘, 汪模辉, 李鉴伦, 等. 镉及镉锌交互作用的植物效应[J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(12): 6-11.
- AI Lun-hong, WANG Mo-hui, LI Jian-lun, et al. Effects of single Cd and interaction between Cd and Zn[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2005, 12(12): 6-11.
- [12] 袁瑞奇, 孟祥芬, 康源春, 等. 平菇对重金属富集机理的研究 [J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(2): 181-185.
- YUAN Rui-qi, MENG Xiang-fen, KANG Yuan-chun, et al. Study on heavy metal accumulation mechanism in *Pleurotus ostreatus*[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(2): 181-185.
- [13] 赵婴荣. 无公害蔬菜产品质量监测技术规范手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004: 105-107.
- ZHAO Ying-rong. Handbook of determination technology and method for pollution-free vegetables[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2004: 105-107.
- [14] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1): 5-8.
- XU Qin-song, SHI Guo-xin, ZHOU Hong-wei, et al. Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated oxygen in leaves of *Ottelia alismoides* (L.) Pers.[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1): 5-8.
- [15] 曲明清, 邢增涛, 谢文明, 等. 培养料中重金属元素对真姬菇产品质量安全的影响[J]. 中国食用菌, 2006, 25(6): 0-23.
- QU Ming-qing, XING Zeng-tao, XIE Wen-ming, et al. Effect of heavy metals in the substrate on production and quality safety of *Hypsizygus marmoreus* cultivated under controlled environment[J]. *Edible Fungi of China*, 2006, 25(6): 20-23.
- [16] 杨春香, 林新坚, 林跃鑫. 镉对姬菇菌丝生长的影响[J]. 中国食用菌, 2004, 23(4): 36-39.
- YANG Chun-xiang, LIN Xin-jian, LIN Yue-xin. Effects of cadmium on the mycelium growth of *Agaricus Blazei* Murill[J]. *Edible Fungi of China*, 2004, 23(4): 36-39.
- [17] Patra J, Lenka M, Panda B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Choris barbata* Sw to mercury, cadmium and zinc[J]. *New Phytologist*, 1994, 128: 165-171.
- [18] 金萍. 茶薪菇富锌深层培养条件研究[J]. 食用菌, 2003(5): 5-7.
- JIN Ping. Study on zinc enriched culture of *Agrocybe Chaxinggu*[J]. *Edible Fungi*, 2003(5): 5-7.
- [19] 魏华, 谢俊杰, 吴凌伟, 等. 金针菇富锌培养及产品研制[J]. 南昌大学学报(理科版), 1995, 12(4): 385-394.
- WEI Hua, XIE Jun-jie, WU Ling-wei, et al. Zinc enriched culture of *Flammulina velutipes* and its product development[J]. *Journal of Nanchang University(Nature Science)*, 1995, 12(4): 385-394.
- [20] 种恒, 刘振声, 谢永泉, 等. 锌等矿质元素在草菇子实体内富集和分布的研究[J]. 食用菌学报, 1995, 2(1): 26-31.
- ZHONG Heng, LIU Zhen-sheng, XIE Yong-quan, et al. Studies on the accumulation and distribution of zinc and other mineral elements in the fruitbody of *Volvariella volvacea*[J]. *Acta Edulis Fungi*, 1995, 2(1): 26-31.
- [21] 雷敬敏, 杨德芬. 食用菌的重金属含量及食用菌对重金属富集作用的研究[J]. 中国食用菌, 1990, 9(6): 14-17.
- LEI Jing-mi, YANG De-fen. Studies on the heavy metal concentration and accumulation effects in the edible fungi[J]. *Edible Fungi of China*, 1990, 9(6): 14-17.
- [22] 徐丽红, 陈俏彪, 叶长文, 等. 食用菌对培养基中有害重金属的吸收富集规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 42-47.
- XU Li-hong, CHEN Qiao-biao, YE Chang-wen, et al. Regularity of heavy metal absorption and accumulation in the cultivated fungi[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(Sup): 42-47.
- [23] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, et al. Heavy metals in the environment; the effect of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 705-711.
- [24] 周启星, 高拯民. 作物籽实中 Cd 与 Zn 的交互作用及其机理的研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(4): 148-151.
- ZHOU Qi-xing, Gao Zheng-min. Interaction between Cd and Zn in seeds of crops and its mechanisms[J]. *Agro-Environment Protection*, 1994, 13(4): 148-151.
- [25] 华璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 393-398.
- HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Combination of pollutants cadmium and zinc and its effects on Cd accumulation in wheat grain and adjustment by organic manure[J]. *Agro-Environment Protection*, 2002, 21(5): 393-398.