

不同品种平菇对4种重金属的吸收富集与安全限量值研究

杨小红¹, 陈慧君¹, 李俊¹, 邹亚杰², 胡清秀^{2*}

(1.农业部微生物产品质量安全风险评估实验室, 北京 100081; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:平菇是我国栽培范围最广、产量最高的食用菌种类, 为了研究不同品种平菇对4种重金属的富集规律及栽培料中重金属的安全限量值, 对3个品种平菇在两种栽培料中分别添加不同浓度Pb、Hg、As、Cd 4种重金属进行栽培试验, 分别测定平菇子实体和栽培料中重金属含量, 并将测定结果采用SPSS软件进行相关性分析。结果显示3个平菇品种对4种重金属的吸收富集能力排序为Cd>As、Hg>Pb, 进行综合分析后筛选出P-8为3个品种中重金属低富集品种。不同栽培料栽培同一平菇品种, 同一栽培料栽培不同平菇品种, 所得料中重金属安全限量值均不相同, 共获得吸收富集回归方程17个, R^2 值均在0.9以上。依据《食用菌卫生标准》(GB 7096—2003)规定的Pb、Hg、As和《绿色食品 食用菌》(NY 749—2012)规定的Cd限量值, 计算得出3种平菇以棉籽壳或玉米芯为主料栽培时相应重金属的安全限量值数据16个: Pb 4个分别是99.56、74.37、58.56、83.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW; Cd 6个分别是0.21、0.13、0.21、0.08、0.07、0.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW; Hg 3个分别是0.08、0.07、0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW; As 3个分别是1.31、2.72、1.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW。

关键词:平菇; 栽培料; 重金属; 吸收富集; 安全限量值

中图分类号: X503 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-0868-07 doi:10.11654/jaes.2014.05.007

Bioaccumulation of Four Kinds of Heavy Metals in Different Varieties of *Pleurotus* spp. and Safety Limits in Culture Substrate

YANG Xiao-hong¹, CHEN Hui-jun¹, LI Jun¹, ZOU Ya-jie², HU Qing-xiu^{2*}

(1. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Microbial Products, Ministry of Agriculture, P.R.China, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: *Pleurotus* spp. is the most popular edible mushroom in China, but often accumulates large amounts of heavy metals from culturing substrates. In this study, different concentrations of lead, mercury, arsenic and cadmium were added to two culturing substrates to examine their bioaccumulation in three varieties of *Pleurotus* spp.. Accumulation of heavy metals in *Pleurotus* spp. decreased in order: Cd>As, Hg>Pb. Of three *Pleurotus* spp., P-8 was found to be the lowest accumulator of four heavy metals. In accordance to Pb, Hg and As Health Standards for Edible Fungi (GB 7096—2003) and Cd Standard for Green Food (NY 749—2012), the safety limits for heavy metals were obtained when the same *Pleurotus* spp. variety was grown in different substrates or different *Pleurotus* spp. varieties were grown in the same substrate. The values of *Pleurotus* spp. P-25', P-5' and P-8 were respectively 99.56, 74.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, and 58.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for Pb; 0.21, 0.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, and 0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for Cd; 0.08, 0.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, and 0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for Hg; and 1.31, 2.72 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW and 1.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for As in cottonseed hull substrates. In corn cob, the limit of Pb was 83.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for P-8 and that of Cd was 0.08, 0.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, and 0.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW for P-25', P-5' and P-8 strains.

Keywords: *Pleurotus* spp.; culture substrate; heavy metal; bioaccumulation; safety limits

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“基于农牧废弃物——食用菌开发体系的农业生境过程控制”(2012BAD14B15-7); 现代食用菌产业技术体系建设专项资金(CARS-24); 国家农产品质量安全风险评估项目

作者简介: 杨小红(1974—), 女, 北京平谷人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事食用菌重金属研究及微生物肥料质检。E-mail: yangxiaohong@caas.cn

* 通信作者: 胡清秀 E-mail: huqingxiu@caas.cn.

食用菌具有独特美味、极高的营养价值和重要的医疗保健功能^[1,2],但对重金属具有富集特性^[3],能够将环境中的重金属吸收、富集到子实体内,人们因食用重金属超标的食用菌而使健康受到威胁。因此,食用菌中重金属安全问题越来越引起人们的关注。国内外许多学者对不同地区的各种野生及栽培食用菌中重金属含量进行了调查和健康评价,发现部分地区某种食用菌重金属污染情况值得关注,同时发现其相应栽培料中的重金属含量也偏高,提出应加强食用菌栽培料中重金属含量的控制^[4-8]。目前,我国相关国家标准和行业标准对食用菌中重金属有严格的限量要求^[9-10],但对于栽培料中重金属的含量限制(安全限量值)还属空白^[11-13],国内已有学者对香菇^[14-15]、双孢菇^[16]、姬松茸^[17]和平菇^[18]开展了这方面的研究,研究结果显示食用菌子实体和栽培料中重金属含量有很高的相关性,控制栽培料中重金属的含量是保证子实体中重金属质量安全的重要措施之一。

平菇(*Pleurotus* spp.)是我国主要栽培的食用菌之一,根据中国食用菌协会统计,2011年产量达563.3万t,居各类食用菌产量之首位,是国内市场的主导品种。目前,国内市场上广泛栽培的平菇有10多种,本文选择3个主栽品种、2种市场广为应用的栽培料,外源添加Pb、Hg、As、Cd,研究不同品种平菇对4种重金属的富集规律,并经相关性分析,获得栽培料中重金属安全限量值,以期和平菇原辅料重金属安全限量标准的科学制定以及重金属污染控制技术提供理论和数据依据。

1 材料与方法

1.1 菌株

实验菌株P-25'、P-5'和P-8分别为佛州侧耳(*Pleurotus florida*)、糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)和肺形侧耳(*Pleurotus pulmonarius*)。上述3个菌种均

来源于中国农业科学院农业资源与农业区划研究所食用菌研究室。

1.2 栽培料

以棉籽壳和玉米芯为栽培主料,配方如下。

棉籽壳栽培料:棉籽壳84%、麸皮15%、石膏粉1%,料水比为1:1.2,pH自然。

玉米芯栽培料:玉米芯84%、麸皮15%、石膏粉1%,料水比为1:1.2,pH自然。

1.3 主要试剂和仪器

氯化汞(HgCl_2)、氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)、三氧化二砷(As_2O_3)和硝酸铅 $[\text{Pb}(\text{NO}_3)_2]$ 由北京化学试剂商店提供,均为国产分析纯。栽培试验用标准溶液按《化学试剂杂质测定用标准溶液的制备》(GB/T 602—2002)的方法配制(以纯金属离子计)。主要仪器包括AFS920型顺序注射双道原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司)和Solaar S4火焰/石墨炉原子吸收光谱仪(美国Thermo Elemental公司),MARS5微波消解仪(美国CEM)。

1.4 试验方法

以P-25'、P-5'和P-8三个平菇品种为试验材料,于棉籽壳栽培料和玉米芯栽培料中分别添加4种重金属(重金属的投加量见表1~表6,均以风干重计)进行栽培试验。采用常规袋栽技术,选用长33cm、宽17cm、厚0.04cm的高密度聚丙烯袋,每袋装料0.55kg(湿料)。在拌料时,先将Hg、Cd、As、Pb试验用标准溶液分别混匀于拌料用水中,再与栽培料充分拌匀后装入聚丙烯袋,每个处理重复30次(袋)。按常规方法进行灭菌、接种、发菌和出菇管理,第一潮菇全部采收。将装袋前各处理的栽培料(约1.5kg)和采收的平菇子实体于自然条件下风干1~2d,置60℃烘箱烘至恒重,粉碎机粉碎后用于重金属的含量测定。

1.5 检测方法

Pb和Cd的测定参照国标GB/T 5009.12—2003^[19]

表1 3种平菇对棉籽壳栽培料中Pb的富集

Table 1 Bioaccumulation of Pb by three *Pleurotus* strains grown in cottonseed hull substrates

添加浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Additional concentration	基质中铅含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Content of Pb in substrate	子实体中铅含量 Concentration of Pb in fruiting body/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.26±0.040	0.48±0.035	0.12±0.000	0.26±0.040	1.827a	0.462b	1.000c
2.2	1.76±0.050	0.08±0.008	0.36±0.005	0.21±0.040	0.045	0.202	0.119
16.5	15.45±0.380	0.11±0.005	0.23±0.015	0.08±0.002	0.007	0.015	0.005
33	22.39±0.500	0.18±0.010	0.32±0.010	0.20±0.000	0.008	0.014	0.009
55	39.43±1.190	0.38±0.045	0.68±0.030	0.69±0.010	0.010	0.017	0.017

注:同行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

表2 3种平菇对玉米芯栽培料中Pb的富集

Table 2 Bioaccumulation of Pb by three *Pleurotus* strains grown in corn cob substrates

添加浓度/mg·kg ⁻¹ Additional concentration	基质中铅含量/mg·kg ⁻¹ Content of Pb in substrate	子实体中铅含量 Concentration of Pb in fruiting body/mg·kg ⁻¹			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.34±0.020	0.46±0.005	0.18±0.000	0.230±0.000	1.358a	0.537b	0.687b
2.2	3.20±0.110	0.66±0.030	0.28±0.000	0.10±0.010	0.206	0.088	0.031
16.5	16.22±0.440	0.45±0.010	0.66±0.060	0.33±0.010	0.028	0.041	0.020
33	44.90±4.725	0.89±0.030	1.28±0.010	0.78±0.025	0.020	0.029	0.017
55	55.20±0.030	0.265±0.015	0.83±0.055	1.06±0.005	0.005	0.015	0.019

表3 3种平菇对棉籽壳栽培料中Cd的富集

Table 3 Bioaccumulation of Cd by three *Pleurotus* strains grown in cottonseed hull substrates

添加浓度/mg·kg ⁻¹ Additional concentration	基质中镉含量/mg·kg ⁻¹ Content of Cd in substrate	子实体中镉含量 Concentration of Cd in fruiting body/mg·kg ⁻¹			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.04±0.005	0.09±0.001	0.13±0.000	0.12±0.005	2.455a	3.377b	3.247b
0.11	0.19±0.000	0.74±0.040	1.42±0.015	0.93±0.020	3.895a	7.500b	4.895c
0.66	0.92±0.015	4.23±0.040	5.22±0.115	3.88±0.025	4.623a	5.699b	4.246a
1.32	2.02±0.035	5.06±0.345	8.16±0.035	6.52±0.080	2.514a	4.052b	3.236c
5.5	6.94±0.125	11.64±0.280	12.46±0.195	8.44±0.005	1.678a	1.796b	1.216c

表4 3种平菇对玉米芯栽培料中Cd的富集

Table 4 Bioaccumulation of Cd by three *Pleurotus* strains grown in corn cob substrates

添加浓度/mg·kg ⁻¹ Additional concentration	基质中镉含量/mg·kg ⁻¹ Content of Cd in substrate	子实体中镉含量 Concentration of Cd in fruiting body/mg·kg ⁻¹			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.04±0.010	0.32±0.005	0.19±0.010	0.18±0.015	8.553a	5.000b	4.868b
0.11	0.17±0.010	1.84±0.010	1.15±0.010	0.97±0.020	10.824a	6.765b	5.706c
0.66	0.76±0.040	2.52±0.010	6.08±0.115	1.59±0.030	3.309a	8.007b	2.092c
1.32	1.48±0.025	2.99±0.055	5.70±0.130	6.55±0.010	2.031a	3.864b	4.441c
5.5	7.36±0.465	4.24±0.065	13.49±0.140	10.76±0.060	0.575a	1.832b	1.461c

表5 3种平菇对棉籽壳栽培料中Hg的富集

Table 5 Bioaccumulation of Hg by three *Pleurotus* strains grown in cottonseed hull substrates

添加浓度/mg·kg ⁻¹ Additional concentration	基质中汞含量/mg·kg ⁻¹ Content of Hg in substrate	子实体中汞含量 Concentration of Hg in fruiting body/mg·kg ⁻¹			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.04±0.001	0.05±0.005	0.20±0.031	0.17±0.012	1.389a	5.472b	4.722b
0.22	0.20±0.030	0.47±0.487	0.26±0.011	0.24±0.002	2.358a	1.274b	1.194c
1.1	0.70±0.008	0.52±0.106	0.60±0.019	0.44±0.014	0.749ab	0.864a	0.634b
1.65	1.00±0.056	0.46±0.031	0.68±0.005	0.53±0.026	0.461a	0.681b	0.527c
2.2	1.92±0.058	0.90±0.121	0.74±0.022	0.74±0.009	0.470a	0.388a	0.383a
2.75	2.14±0.105	1.01±0.040	0.92±0.028	0.97±0.013	0.474a	0.430 ab	0.454b
3.3	2.43±0.084	1.04±0.009	1.05±0.026	1.29±0.064	0.430a	0.433a	0.531b
4.4	3.08±0.259	1.46±0.057	1.16±0.032	1.95±0.146	0.473a	0.375b	0.633c
5.5	3.78±0.040	1.48±0.097	1.23±0.009	1.81±0.073	0.392a	0.326b	0.478c
6.6	4.30±0.095	1.79±0.079	1.99±0.076	2.09±0.034	0.416a	0.462b	0.485b
11	8.55±0.615	2.40±0.061	2.44±0.210	2.59±0.080	0.280a	0.286a	0.303a

表 6 3 种平菇对棉籽壳栽培料中 As 的富集

Table 6 Bioaccumulation of As by three *Pleurotus* strains grown in cottonseed hull substrates

添加浓度/mg·kg ⁻¹ Additional concentration	基质中砷含量/mg·kg ⁻¹ Content of As in substrate	子实体中砷含量 Concentration of As in fruiting body/mg·kg ⁻¹			富集系数 Bioaccumulation coefficient		
		P-25'	P-5'	P-8	P-25'	P-5'	P-8
0	0.07±0.004	0.09±0.007	0.027±0.006	0.03±0.008	1.362a	0.391b	0.435b
1.1	0.29±0.016	0.36±0.004	0.31±0.021	0.28±0.014	1.252a	1.055b	0.972b
2.2	1.36±0.037	1.22±0.023	0.83±0.016	1.67±0.040	0.901a	0.611b	1.232c
3.3	2.87±0.028	1.84±0.023	1.08±0.036	1.53±0.070	0.643a	0.378b	0.534c
4.4	4.69±0.027	2.09±0.038	1.25±0.050	1.89±0.078	0.445a	0.267b	0.403c
5.5	5.13±0.024	2.53±0.040	1.66±0.035	2.20±0.082	0.493a	0.323b	0.429c
6.6	6.42±0.092	2.79±0.063	1.97±0.023	3.45±0.067	0.434a	0.307b	0.538c
7.7	7.88±0.078	3.92±0.032	2.00±0.033	3.69±0.078	0.498a	0.254b	0.468c
8.8	9.15±0.157	4.89±0.054	2.10±0.033	3.99±0.123	0.535a	0.230b	0.436c
9.9	10.36±0.079	5.34±0.168	1.94±0.027	3.63±0.050	0.515a	0.187b	0.350c
11	11.62±0.038	6.40±0.232	2.14±0.046	4.16±0.116	0.551a	0.184b	0.358c

和 GB/T 5009.15—2003^[20],湿式消解法消解平菇子实体和栽培料,用石墨炉原子吸收分光光度计测定;Hg 参照国标 GB/T 5009.17—2003^[21],微波消解法消解,用原子荧光光度计测定;As 参照国标 GB/T 5009.11—2003^[22],湿消解法消解,原子荧光光度计测定。通过添加 4 种重金属标准溶液(国家标准物质中心提供)测定回收率进行质量控制。

1.6 数据计算与处理

采用 SPSS 软件进行富集能力差异显著性分析($P<0.05$),对栽培料和平菇子实体中重金属含量进行回归分析,然后依据《食用菌卫生标准》(GB 7096—2003)^[9]中对 As、Pb、Hg 以及《绿色食品 食用菌》(NY/T 749—2012)^[10]中对 Cd 的限量规定,计算平菇栽培料中 4 种重金属的安全限量值。安全限量值为食用菌子实体中某种重金属的含量等于国家卫生标准限量值时,所对应的栽培料中某种重金属的含量值,也称临界值。富集系数为食用菌子实体中某种重金属的含量与相应栽培料中重金属含量之比。

2 结果与分析

2.1 不同品种平菇对两种栽培料中 Pb 的富集

3 种平菇对两种栽培料中 Pb 的富集情况见表 1 和表 2。可以看出,3 种平菇对 Pb 的富集程度均很弱,在添加浓度为 0~55 mg·kg⁻¹ 范围内,子实体中 Pb 含量最大值也只有 1.28 mg·kg⁻¹,没有超过标准规定的限量值。在供试浓度范围内,P-25'、P-5'、P-8 对棉籽壳料中 Pb 的富集系数平均值分别为 0.379、0.142 和 0.230,对玉米芯料中 Pb 的富集系数平均值分别为

0.323、0.142 和 0.155,富集系数最低。

富集能力在 0 添加浓度下最高,将 0 添加浓度下 3 个品种平菇对两种料中 Pb 的富集能力(富集系数)进行差异显著性分析发现:在棉籽壳料中,3 种平菇对 Pb 富集能力差异显著,富集能力大小排序为 P-25'>P-8>P-5';P-8 和 P-5'对玉米芯料中 Pb 的富集差异不显著,两者与 P-25'差异显著,表明 P-25'对 Pb 的富集能力强于 P-8 和 P-5'。

3 种平菇对 Pb 的富集回归方程、相关系数及安全限量值见表 7。当子实体中 Pb 限量值 $y=2.0$ mg·kg⁻¹ 时,得到以棉籽壳料栽培 P-25'、P-5'和 P-8 三种平菇,栽培料中 Pb 的安全限量值分别为 99.56、74.37、58.56 mg·kg⁻¹,以玉米芯料栽培 P-8,料中 Pb 的安全限量值为 83.64 mg·kg⁻¹。玉米芯料栽培的 P-25'和 P-5'与栽培料中的 Pb 含量没有相关性,因而没有得到相应安全限量值。

2.2 不同品种平菇对 Cd 的富集

3 种平菇对 Cd 的富集作用最强(表 3 和表 4),富集系数最高为 10.824,即子实体中 Cd 富集量为基质中的 10.824 倍;在 0.11 mg·kg⁻¹ 添加浓度下,50% 子实体中 Cd 超标,0.66 mg·kg⁻¹ 添加浓度下,100% 子实体中 Cd 超标。将系列添加浓度下的富集系数进行平均,得 P-25'、P-5'和 P-8 对棉籽壳料中 Cd 的富集系数平均值分别为 3.033、4.485、3.368,对玉米芯栽培料中 Cd 的富集系数平均值分别为 5.058、5.093 和 3.714,富集系数最高。

将各添加浓度下的富集系数进行差异显著性分析显示:在棉籽壳料中,P-5'对 Cd 的富集能力最强,

P-8 居中, P-25' 最弱; 在玉米芯料中, P-25' 对 Cd 的富集能力最强, P-5' 居中, P-8 最弱。

3 种平菇对 Cd 的富集规律回归方程见表 7, 相关系数均达到 0.95 及以上。当子实体中 Cd 限量值 $y=1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 计算以棉籽壳为主料栽培 P-25'、P-5' 和 P-8 三种平菇, 基质中 Cd 安全限量值分别为 0.21、0.13、0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 以玉米芯为主料栽培 P-25'、P-5' 和 P-8, 基质中 Cd 安全限量值分别为 0.08、0.07、0.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 不同品种平菇对 Hg 的富集

P-25'、P-5' 和 P-8 在供试浓度范围内对棉籽壳栽培料中 Hg 的富集系数平均值分别为 0.717、0.999 和 0.940 (表 5), 富集系数介于 Pb 和 Cd 之间。3 个品种不同添加浓度下富集能力的差异显著性比较显示排序各不相同, 因而无法判断哪个品种对 Hg 的富集能力更强或更弱。

对 Hg 的富集规律见表 7, 当子实体中 Hg 限量值 $y=0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 获得以棉籽壳为主料栽培 P-25'、P-5' 和 P-8, 其栽培基质中 Hg 的安全限量值分别为 0.08、0.07、0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.4 不同品种平菇对 As 的富集

3 种平菇对棉籽壳栽培料中 As 的富集见表 6。在供试浓度范围内, P-25'、P-5'、P-8 对 As 的富集系数平均值分别为 0.694、0.381 和 0.560, 富集能力介于 Pb 和 Cd 之间, 且低于 Hg。结合各添加浓度下富集系

数差异显著性分析结果, 综合分析可得: 在棉籽壳料中, P-25' 对 As 的富集能力相对较强, P-8 居中, P-5' 最弱。富集回归方程、相关系数及安全限量值见表 7, 当子实体中 As 限量值 $y=1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 计算栽培料中 As 的安全限量值, P-25' 为 1.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, P-5' 为 2.72 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, P-8 为 1.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 讨论

段冷曼^[23]的研究显示, 平菇对 Pb 的富集系数范围在 0.029~0.063, 平均值为 0.040; 本研究中, 3 种平菇对 Pb 的富集系数范围在 0.005~1.827, 平均值为 0.041, 与段冷曼的结果基本一致。段冷曼^[23]对 Cd 的富集规律研究中, 富集系数范围在 7.876~13.022, 平均值为 10.10; 本实验中 3 种平菇对 Cd 的富集系数范围在 0.575~10.824, 平均值为 4.125, 低于段冷曼的实验数据。这可能缘于平菇品种不同, 并且平菇对 Cd 的强富集能力使品种间的差异更加明显。

栽培基质中重金属的临界值可通过本研究采用的外加重金属进行栽培实验的方法获得, 也可以采取另一种方法获得。贾彦^[24]通过分析采集自不同地区的平菇子实体及其对应栽培料中重金属含量的相关性, 获得富集回归方程, 计算得到栽培料中 Pb 的临界浓度为 12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 0.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 为 1.86 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Cd 和 As 均在本实验获得的临界值范围内; Pb 的临界值与本实验获得的临界值范围相差较大, 可能由于

表 7 3 种平菇对 4 种重金属的吸收富集回归方程及安全限量值

Table 7 Regression equations for bioaccumulation of four heavy metals in three *Pleurotus* strains and safety limits

重金属 Heavy metal	栽培料 culture substrate	平菇品种 <i>Pleurotus</i> strains	回归方程与相关性 Regression equations and correlation coefficients		安全限量值 Safety limits/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Pb	棉籽壳 Cottonseed hull	P-25'	$y=0.000 \ 2x^2-0.000 \ 6x+0.077 \ 2$	$R^2=0.994$	99.56
		P-5'	$y=0.000 \ 4x^2-0.006x+0.234 \ 1$	$R^2=0.831$	74.37
		P-8	$y=0.000 \ 9x^2-0.022 \ 9x+0.254 \ 7$	$R^2=0.993$	58.56
Cd	玉米芯 Corn cob	P-8	$y=0.000 \ 2x^2+0.005 \ 2x+0.165 \ 9$	$R^2=0.982$	83.64
		P-25'	$y=-0.208 \ 3x^2+3.063 \ 7x+0.378 \ 5$	$R^2=0.975$	0.21
		P-5'	$y=-0.470 \ 2x^2+5.000 \ 8x+0.370 \ 1$	$R^2=0.992$	0.13
	棉籽壳 Cottonseed hull	P-8	$y=-0.418 \ 8x^2+4.097 \ 9x+0.148 \ 3$	$R^2=0.996$	0.21
		P-25'	$y=0.709 \ 7\ln(x)+2.798 \ 1$	$R^2=0.985$	0.08
		P-5'	$y=-0.413 \ 8x^2+4.787 \ 4x+0.651 \ 1$	$R^2=0.947$	0.07
Hg	玉米芯 Corn cob	P-8	$y=-0.439 \ 2x^2+4.734 \ 1x-0.266$	$R^2=0.962$	0.27
		P-25'	$y=-0.022x^2+0.451 \ 2x+0.162$	$R^2=0.974$	0.08
		P-5'	$y=0.712 \ 9x^{0.472 \ 3}$	$R^2=0.931$	0.07
	棉籽壳 Cottonseed hull	P-8	$y=-0.036 \ 2x^2+0.613 \ 8x+0.026 \ 2$	$R^2=0.952$	0.29
		P-25'	$y=0.812 \ 6x^{0.769 \ 5}$	$R^2=0.986$	1.31
		P-5'	$y=-0.021 \ 8x^2+0.427 \ 3x$	$R^2=0.956$	2.72
As	棉籽壳 Cottonseed hull	P-8	$y=0.577 \ 1x^{0.889 \ 8}$	$R^2=0.943$	1.85

子实体对于栽培料中固有的重金属和外源添加的重金属富集存在差异导致,具体原因还有待研究。因栽培料和子实体中 Hg 的含量均较低且相近,没有显著相关性,在这种情况下,采用外加重金属进行栽培实验的方法可获得较为可靠的临界值数据。

重金属投加浓度不同获得的安全限量值也会有差异。徐丽红等^[15]在研究香菇对镉的富集规律实验中,第一次投加梯度设置为 0、0.5、1、5、10、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,获得的临界值为 0.085 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;第二次的投加梯度范围设置更加精密为 0、0.08、0.09、0.10、0.11、0.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,获得的临界值为 0.134 7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,两次实验结果差异较大。本实验获得的 Cd、Hg、As 的安全限量值均在添加浓度范围内,但数值均较低,提示在以后的实验中应缩小添加浓度范围进行更精密的梯度设置;获得的 4 个 Pb 安全限量值均超过投加浓度,在下一步实验中需设置更高的投加浓度,并进行多次重复实验以获得更为准确的安全限量值数据。

另外,有研究表明重金属的毒性与形态有关,不同形态的重金属毒性相差很大,如一般认为无机砷的毒性大,有机砷的毒性较小或无毒。总砷超标的食用菌中总无机砷含量并不一定高,总砷含量与其食用安全性不存在对应关系^[25-26]。我国食用菌标准中砷的指标设定和限量标准有望更改,那么在研究栽培料中砷元素安全限量值时也应该考虑测定总无机砷含量,以适应未来研究的发展与相关标准的修订。

4 结论

本研究结果显示:3 个品种平菇对 Cd 的富集能力均最强,对 As 和 Hg 的富集能力居中,对 Pb 的富集能力最弱;通过比较富集系数,综合分析可得 P-8 为 3 个品种平菇中 4 种有害重金属低富集品种,生产上应作为首选。

本实验研究了 3 个平菇品种对两种栽培料中 Pb、Cd、Hg、As 的富集规律并进行了临界值计算,结果显示:不同栽培料栽培同一品种平菇,同一栽培料栽培不同品种平菇,富集规律各不相同;由不同吸收富集曲线获得的栽培料中的重金属安全限量值也不相同,Pb 临界值范围为 58.56~99.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cd 为 0.07~0.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Hg 为 0.07~0.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,As 为 1.31~2.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

致谢:感谢本实验室胡小花、杨昕、张文杰、李力给予本试

验研究工作的大力支持与帮助。

参考文献:

- [1] 史琦云,邵威平. 八种食用菌营养成分的测定与分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2003, 38(3):336-339.
SHI Qi-yun, SHAO Wei-ping. Determination of nutritive components of eight edible fungi[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2003, 38(3):336-339.
- [2] 吴锦文. 食用菌的医疗保健作用及其发展趋势[J]. 生物学通报, 1999, 34(9):18-19.
WU Jin-wen. Medical and health function of edible fungi and its development trend[J]. *Bulletin of Biology*, 1999, 34(9):18-19.
- [3] 于德洋,程显好,罗毅,等. 大型真菌重金属富集的研究进展[J]. 中国食用菌, 2011, 30(1):10-13.
YU De-yang, CHENG Xian-hao, LUO Yi, et al. Research progress on accumulation of heavy metal in macro-fungi[J]. *Edible Fungi of China*, 2011, 30(1):10-13.
- [4] Cocchi L, Vescovi L, Petrini L E, et al. Heavy metals in edible mushrooms in Italy[J]. *Food Chemistry*, 2006 (98):277-284.
- [5] Elekes C C, Busuioc G, Ionita G. The bioaccumulation of some heavy metals in the fruiting body of wild growing mushrooms [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2010, 38(2), Special Issue:147-151.
- [6] 赵玉卉,王秉峰,路等学,等. 几种市售鲜食用菌重金属含量及评价[J]. 中国食用菌, 2010, 29(4):32-34.
ZHAO Yu-hui, WANG Bing-feng, LU Deng-xue, et al. Analysis and assessment of heavy metal pollution in several fresh edible fungi in market[J]. *Edible Fungi of China*, 2010, 29(4):32-34.
- [7] 胡清秀,杨昕,杨小红,等. 外源重金属对杏鲍菇生长发育的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):236-243.
HU Qing-xiu, YANG Xin, YANG Xiao-hong, et al. Effect of exogenous heavy metals on growth and development of *Pleurotus eryngii*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):236-243.
- [8] 张玉洁,胡国海,李洪超. 云南省部分地区食用菌重金属含量的分析及评价[J]. 北方园艺, 2011(20):171-174.
ZHANG Yu-jie, HU Guo-hai, LI Hong-chao. Analysis and assessment of heavy metal pollution in fresh edible meshroom collected from several aereas in Yunnan Province[J]. *Northern Horticulture*, 2011(20):171-174.
- [9] 中华人民共和国农业部. GB 7096—2003 食用菌卫生标准[S]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. GB 7096—2003 Hygienic standard for edible fungi[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [10] 中华人民共和国农业部. NY 749—2012 绿色食品 食用菌[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 749—2012 Green food: Edible mushroom[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [11] 中华人民共和国农业部. NY 5099—2002 无公害食品 食用菌栽培

- 基质安全技术要求[S]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 5099—2002 Pollution-free food: Safety technical requirement of cultivar substrate for edible fungi[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [12] 中华人民共和国农业部. NY 5358—2007 无公害食品 食用菌产地环境条件[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 5358—2007 Pollution-free food: Environmental conditions[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [13] 中华人民共和国农业部. NY/T 1935—2010 食用菌栽培基质质量安全要求[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1935—2010 Quality and safety requirements for cultivar substrate for edible fungi[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [14] 徐丽红, 吴应森, 陈俏彪, 等. 香菇对培养基中有害重金属的吸收富集规律及临界含量值[J]. 浙江农业学报, 2007, 19(3): 211–215.
- XU Li-hong, WU Ying-miao, CHEN qiao-biao, et al. Dynamics of absorption and accumulation of *Lentinula edodes* accumulated heavy metals from culture medium and critical contents[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2007, 19(3): 211–215.
- [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] 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 accumulation of heavy metal lead and cadmium in *Agaricus bisporus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [17] 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.
- [18] 杨小红, 胡清秀, 韩立荣. 平菇对培养料中有害重金属的富集及临界含量值研究[J]. 食用菌学报, 2009, 16(3): 67–71.
- YANG Xiao-hong, HU Qing-xiu, HAN Li-rong. Bioaccumulation of cadmium, lead, mercury and arsenic in *Pleurotus ostreatus* fruit bodies and their critical concentration in the cultivation substrate[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2011, 30(2): 236–243.
- [19] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.12—2003 食品中铅的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health, National Standardization Management Committee. GB/T 5009.12—2003 Determination of lead in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [20] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.15—2003 食品中镉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health, National Standardization Management Committee. GB/T 5009.15—2003 Determination of cadmium in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [21] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.17—2003 食品中总汞及有机汞的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health, National Standardization Management Committee. GB/T 5009.17—2003 Determination of total mercury and organic-mercury in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [22] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.11—2003 食品中总砷及无机砷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health, National Standardization Management Committee. GB/T 5009.11—2003 Determination of total arsenic and organic-arsenic in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [23] 段冷曼. 吉林省五种主要食用菌中四种重金属的含量及富集规律的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- DUAN Leng-man. Study of 4 heavy metal pollution in 5 main edible fungi and the regularity of their accumulation in Jilin Province[D]. Changchun: Jinlin University, 2006.
- [24] 贾彦. 北京市食用菌重金属含量调查与风险评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- JIA Yan. Research and risk assessment on some heavy metals in edible fungi in Beijing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007.
- [25] 林燕燕, 王丙涛, 颜治, 等. 食用菌中的总砷和砷形态分布研究[J]. 食品科技, 2012, 37(5): 295–299.
- LIN Yan-kui, WANG Bing-tao, YAN Zhi, et al. Total arsenic and arsenic species analysis in edible fungus[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(5): 295–299.
- [26] 韦超. 砷元素形态的分析方法研究及其在食品安全领域的应用[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- WEI Chao. A study on arsenic speciation and its application to safety evaluation of food[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.