

外源重金属对杏鲍菇生长发育的影响研究

胡清秀, 杨 昕, 杨小红, 曹凤明

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:杏鲍菇是中国等亚洲国家广泛栽培的一种食用菌,培养基中重金属影响杏鲍菇的生长和品质。采用常规袋栽培技术,通过对杏鲍菇栽培过程中添加不同水平 Pb、As、Hg 和 Cd,研究了其毒害效应、耐受性以及对其生长发育、产量的影响。结果表明,在试验设置的浓度范围内,外源添加 Pb、Hg、Cd 的处理对杏鲍菇菌丝生长均产生抑制作用,菌丝生长速度最低值分别比空白对照降低了 24.0%、31.0%、18.7%;但浓度为 5~50 mg·kg⁻¹ 的 As 可能会促进菌丝生长,且添加 As 的处理促进杏鲍菇提早出菇。杏鲍菇对 4 种重金属的耐性指数排列顺序为 As>Cd>Pb>Hg。添加一定浓度的重金属可导致杏鲍菇细胞变形、细胞壁溶解,且细胞质中形成大量黑色颗粒状结晶异物。因此,在杏鲍菇栽培中应控制其培养料中的重金属含量。

关键词:杏鲍菇;外源重金属;耐性指数;细胞超微结构

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)02-0236-08

Effect of Exogenous Heavy Metals on Growth and Development of *Pleurotus eryngii*

HU Qing-xiu, YANG Xin, YANG Xiao-hong, CAO Feng-ming

(Institute of Agro-Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: *Pleurotus eryngii* is widely cultivated in China and other Asia countries, the growth and quality of *P. eryngii* can be affected by heavy metals in culture medium. The paper mainly studied the inhibited effects, tolerance index, growth and development of exogenous heavy metals on *P. eryngii* by the way to mixed different concentrations of As, Pb, Hg and Cd with culture medium during cultivated period. The results indicated that mycelium growth of *P. eryngii* was inhibited by the addition of exogenous Pb, Hg and Cd in medium, and the minimum mycelium growth speeds under the treatments were 24.0%、31.0%、18.7% lower than that of the control in the predetermined concentration range. However, the addition of As at the concentration of 5~50 mg·kg⁻¹ accelerated the mycelium growth and advanced the fruiting time. The tolerance of *P. eryngii* to the heavy metals was As>Cd>Pb>Hg. Addition of the heavy metals could cause the changes of cell ultrastructure of *P. eryngii*, including cytomorphosis, cell wall lysis, and formation of large amounts of black granular crystals in cytoplasm. Consequently, it was essential to control the concentrations of heavy metals in culture medium of *P. eryngii*.

Keywords: *Pleurotus eryngii*; exogenous heavy metals; tolerance index; cell ultrastructure

食用菌在我国广泛栽培,备受广大消费者的喜爱,但近年来,越来越多的研究表明食用菌子实体对重金属存在较强的富集作用,且不同品种对重金属元素的富集能力不同^[1-3]。Hatvani 等研究发现,香菇(*L. edodes*)对 Cd、Hg 敏感,对 Pb 不敏感,Pb 易在菌丝和子实体中积累,导致其存在食用危险^[4-6]。李开本等研究发现,巴西蘑菇子实体富集 Cd 能力较强,达 13~23

mg·kg⁻¹,而 Pb、As、Hg 含量基本正常^[7-10]。食用菌对重金属富集能力的差异,表现为对重金属的敏感性或耐性指数大小,食用菌对重金属的富集能力越强,重金属对其生长发育的影响就越小,耐性指数越大,则产品安全系数越小,反之亦然。尽管关于食用菌对重金属富集利用的研究已有报道,但对不同品种食用菌富集特征及产品安全性影响等的研究仍有待进一步加强。杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)别名刺芹侧耳,是一种典型的木腐菌担子菌,其质地脆嫩、营养丰富,近年来在中国、日本、韩国等亚洲国家的栽培规模和产量均大幅度增加。本研究以杏鲍菇为试验材料,研究外源添加重金属对杏鲍菇生长发育及耐性等的影响,旨在为杏鲍菇的安全生产提供参考依据。

收稿日期:2010-07-22

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金资助;中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“食用菌重金属含量调研及栽培基质中重金属临界值研究”(2009-12);国家科技支撑计划(2008BADA1B08)

作者简介:胡清秀(1963—),女,研究员,主要从事食用菌栽培技术与产品开发研究。E-mail:hqx9758@126.com

1 材料与方法

1.1 菌种

杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)菌株,编号为1206,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开发中心。

1.2 试剂

硝酸铅[Pb(NO₃)₂]、三氧化二砷[As₂O₃]、氯化汞[HgCl₂]、氯化镉[CdCl₂]等标准溶液按 GB/T 602—2002《化学试剂 杂质测定用标准溶液的制备》中的方法配制。

1.3 栽培方法

1.3.1 培养基配方

棉籽壳 90%,麦麸 9%,石灰 1%,调节培养料的 pH 值为 7.0;水适量(料水比 1:1.2),含水量 65%。

添加不同重金属处理之前,按照 1.6 的方法,测定培养料中 4 种重金属的实际含量,即背景值,分别为:Pb 为 0.1 mg·kg⁻¹,As<0.01 mg·kg⁻¹,Hg<0.000 15 mg·kg⁻¹,Cd 为 0.11 mg·kg⁻¹。

1.3.2 栽培方法

采用常规袋栽培技术,按培养基配方拌料,添加不同浓度的 Pb、As、Hg、Cd 溶液于培养料中,使其达到相应处理的浓度(以培养料干重计),将其充分拌匀后装入长 33 cm、宽 15 cm、厚 0.04 cm 的高密度聚乙烯袋中,每袋装干料 0.25 kg。不同处理的栽培袋均按常规方法灭菌、接种和出菇管理,接种量均为每袋麦粒种 10 粒,25℃下培养,发菌阶段记录菌丝生长量和长势,计算菌丝生长速度;出菇阶段第一茬菇全部采收,记录子实体生长状况、产量,计算生物学效率、耐性指数。

1.4 试验设计

试验每种重金属设 4 个不同浓度处理,共计 17 个处理(表 1),每个处理重复 15 袋。

1.5 相关指标计算方法

菌丝生长速度(mm·d⁻¹)=一定天数内菌丝生长量(mm)/生长天数(d)

生物学效率(%)=子实体鲜重(g)/培养料干重(g)×100

耐性指数(%)=重金属处理下子实体鲜重(g)/对照子实体鲜重(g)×100

1.6 重金属含量的测定

采收的杏鲍菇子实体经微波消解仪消解后,按下列国家标准:GB/T 5009.12—2003、GB/T 5009.11—

表 1 重金属的添加浓度

Table 1 Concentration of different treatments

处理 Treatment	重金属种类 Heavy metal	添加浓度 Concentration/ mg·kg ⁻¹
1	CK	0
2	Pb	0.1
3	Pb	1
4	Pb	10
5	Pb	100
6	As	0.05
7	As	0.5
8	As	5
9	As	50
10	Hg	0.01
11	Hg	0.1
12	Hg	1
13	Hg	10
14	Cd	0.02
15	Cd	0.2
16	Cd	2
17	Cd	20

2003、GB/T 5009.17—2003、GB/T 5009.15—2003 中的第一法分别测定 Pb、As、Hg、Cd。

1.7 细胞超微结构观察

采集对照(CK)和 4 种重金属 Pb、As、Hg、Cd 分别为 100、50、10、20 mg·kg⁻¹ 浓度下(即试验设置的最高浓度)生长的新鲜子实体(菌盖、菌柄),经过固定液处理,样品切片、染色等处理后,用透射电镜分别观察杏鲍菇组织中细胞的形态。该观察在中国农业科学院农产品加工研究所电镜室完成。

2 结果与分析

2.1 不同重金属处理对杏鲍菇菌丝生长的影响

不同重金属各浓度处理对杏鲍菇菌丝生长的影响结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出:向培养料中添加 Pb 浓度范围为 0.1~100 mg·kg⁻¹ 时,菌丝的生长速度均低于对照(CK),其中,添加浓度 0.1 mg·kg⁻¹ 和 1 mg·kg⁻¹ 处理与对照间差异极显著($P<0.01$),但添加浓度为 10、100 mg·kg⁻¹ 时,菌丝生长速度与对照间的差异不明显,这表明 Pb 对杏鲍菇菌丝生长有一定毒害作用,但即使在较高的 Pb 浓度下,杏鲍菇菌丝对 Pb 仍表现出较强的耐受能力;对 As 而言,当添加量为 0.05~50 mg·kg⁻¹

时,菌丝生长速度差异均不显著,而浓度为 5~50 mg·kg⁻¹ 的 As 可能会促进菌丝生长;在 Hg 处理下,在 0.01~10 mg·kg⁻¹ 浓度范围内菌丝生长速度受到明显抑制,除 0.01 mg·kg⁻¹ 的处理外,其他各浓度的添加处理均与空白对照间差异极显著($P<0.01$),表明 Hg 对杏鲍菇菌丝存在较强的毒害作用;从 Cd 的情况看,各添加量处理下杏鲍菇菌丝生长速度都低于空白对照,且除 0.2 mg·kg⁻¹ 添加处理外,其他各处理均与对照处理间存在显著差异($P<0.05$),尤其是 20 mg·kg⁻¹ 的处理下杏鲍菇菌丝生长速度大大低于对照,两者间差异极显著($P<0.01$),说明培养料中添加一定浓度的 Cd 对杏鲍菇菌丝生长产生抑制作用,在高浓度下,对菌丝生长的抑制作用更为明显。

2.2 不同重金属处理对杏鲍菇子实体形态的影响

向培养料中添加 Pb、As、Hg、Cd 等不同类别重金属后,杏鲍菇子实体形态受到明显影响,如表 3 所示。可以看出,与对照相比,各处理下杏鲍菇子实体的菌柄平均长度和直径都有不同程度的减小,菌盖的平均

直径也有所下降。就菌柄平均长度而言,Pb、Cd 处理与对照存在 $P=0.05$ 水平的显著性差异,分别降低了 31.3%、37.5%;菌柄平均直径分别减小了 35.3%、9.8%、31.4%、13.7%,但是与对照比较,不存在显著性差异;而 4 种重金属处理后菌盖的平均直径与对照均存在显著性差异($P<0.05$),分别下降了 26.1%、18.5%、30.4%、39.1%。不仅如此,在栽培过程中还发现,各重金属处理下的现蕾期和出菇时间等呈现一定差异(见表 4),现蕾时间的差异表现为:添加 As、Hg、Cd 后,现蕾时间与对照存在显著差异($P<0.05$),且在现蕾期,空白对照组出现的原基数量少个体大,出菇时只出现 1~2 个菇体较大的个体;其他各处理与对照相比,出现的原基数量多但个体小,出菇时多为丛生。在出菇时间上,以培养料中添加 As 的菌袋出菇最早,接种后至第一茬菇出菇时间为 63 d,且第一茬出菇较整齐;其次是添加 Pb 的处理,出菇时间为 65 d,与空白对照出菇时间相同;培养料中添加 Hg 和 Cd 的处理出菇时间,晚于前两者 5~8 d,且与空白存在显著差异($P<0.05$)。

表 2 不同浓度重金属处理菌丝生长

Table 2 Effect of different heavy metal concentrations on the mycelium growth

重金属 Heavy metal	浓度 Concentration/ mg·kg ⁻¹	菌丝生长速度 Growth speed of mycelium/ mm·d ⁻¹	菌丝长势 Growth potential	差异显著性 Significance levels	
				$P_{0.05}$	$P_{0.01}$
Pb	CK	3.41±0.099	+++	a	A
	0.1	2.59±0.128	++	c	C
	1	2.83±0.061	++	b	B
	10	3.29±0.150	+++	a	A
	100	3.24±0.067	+++	a	A
As	CK	3.41±0.099	+++	a	A
	0.05	3.80±0.234	++++	a	A
	0.5	3.09±0.612	+++	a	A
	5	3.70±0.488	++++	a	A
	50	3.66±0.235	++++	a	A
Hg	CK	3.41±0.099	+++	a	A
	0.01	3.24±0.134	+++	a	AB
	0.1	2.98±0.145	++	b	BC
	1	2.70±0.030	++	c	C
	10	2.35±0.207	++	d	D
Cd	CK	3.41±0.099	+++	a	A
	0.02	3.22±0.037	+++	b	A
	0.2	3.23±0.087	+++	ab	A
	2	3.18±0.187	+++	b	A
	20	2.77±0.048	++	c	B

注:++++为长势最好,菌丝整齐密白粗壮;+++为长势较好,菌丝整齐;++为长势一般,菌丝较白。

Note: ++++ means prosperous growth; +++ means normal growth; ++ means slow growth.

表 3 不同处理子实体形态

Table 3 Effect of different treatments on the fruit body morphology

重金属 Heavy metal	浓度 Concentration/ mg·kg ⁻¹	菌柄平均长度 Stem length/cm		菌柄平均直径 Diameter of stem/mm		菌盖平均直径 Diameter of pileus/mm		子实体性状 Character of fruit body
CK	0	16±2	b	5.1±2.2	a	9.2±1.4	b	菇体圆整,柄长,柄粗
Pb	1.0	11±2	a	3.3±1.6	a	6.8±0.8	ab	柄短,易开伞
As	0.5	12±3	ab	4.6±1.4	a	7.5±2.0	ab	柄短,菌盖大,出菇早
Hg	0.1	14±3	ab	3.5±1.8	a	6.4±2.1	ab	柄长,易开伞
Cd	0.2	10±3	a	4.4±1.1	a	5.6±1.4	a	柄短,出菇晚,肉质紧实

注:不同字母表示差异显著性($P=0.05$)。下同。
Note: Different letter means significance levels($P=0.05$). The same below.

表 4 不同处理现蕾、出菇和采收时间

Table 4 Time for flower bud, producing mushroom and harvesting by different treatments

重金属 Heavy metal	浓度 Concentration/mg·kg ⁻¹	现蕾时间 pinhead phase/d		出菇时间 Fruit-body shape/d		第一茬菇采收时间 Harvest time/d
CK	0	47	b	65	a	出菇后 5~7
Pb	1.0	48	b	65	a	出菇后 5~7
As	0.5	45	a	63	a	出菇后 5~7
Hg	0.1	52	c	70	b	出菇后 5~7
Cd	0.2	54	d	71	b	出菇后 5~7

2.3 不同重金属处理后杏鲍菇子实体产量、生物学效率和耐性指数

在不同浓度 Pb、As、Hg、Cd 处理下,杏鲍菇子实

体产量与生物学效率的变化如表 5 所示。与对照相比,在培养料中添加 Pb、Hg、Cd,杏鲍菇子实体产量与生物学效率均显著低于空白对照,且与对照处理间存

表 5 不同浓度重金属处理子实体产量、生物学效率和耐性指数

Table 5 Effect of different heavy metal concentrations on the yield, biological efficiency and tolerance index

重金属 Heavy metal	浓度 Concentration/ mg·kg ⁻¹	平均产量 Average yield/g	差异显著性 Significance levels		生物学效率 Biological efficiency/%	耐性指数 Tolerance index/%
			$P_{0.05}$	$P_{0.01}$		
Pb	CK	161.02	a	A	64	—
	0.1	87.09	b	B	35	54
	1	93.10	b	B	37	58
	10	85.28	b	B	34	53
	100	78.36	b	B	31	49
As	CK	161.02	a	A	64	—
	0.05	124.63	ab	A	50	77
	0.5	122.21	ab	A	49	76
	5	98.77	b	A	40	61
	50	99.76	b	A	40	62
Hg	CK	161.02	a	A	64	—
	0.01	96.71	b	B	39	60
	0.1	89.54	b	B	36	56
	1	82.62	b	B	33	51
	10	66.13	b	B	26	41
Cd	CK	161.02	a	A	64	—
	0.02	100.92	b	B	40	63
	0.2	101.62	b	B	41	63
	2	101.50	b	B	41	63
	20	72.59	b	B	29	45

在极显著差异($P<0.01$)。而对于添加不同浓度的 As 处理,当 As 浓度 $>5.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,子实体产量和生物学效率比对照显著降低($P<0.05$),但在低浓度($0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理下,子实体产量与对照差异不明显。从生物学效率看,在 4 种重金属最大添加浓度处理下的生物学效率比对照都有明显降低,降低幅度为 Pb 51.6%,As 37.5%,Hg 59.3%和 Cd 54.6%。从各处理下杏鲍菇的耐性指数看,各重金属处理下耐性指数以 As 最高,Cd 其次,Hg 最低,而 Pb 的耐性指数介于 Cd 与 Hg 之间,高耐性指数表明杏鲍菇在该重金属处理下没有受到明显的毒害,耐性指数低则表明培养料中的重金属对杏鲍菇有一定的毒害作用;从 4 种重金属的情况看,随着重金属添加浓度的增加,耐性指数逐渐降低,毒害作用也逐渐增强。

2.4 杏鲍菇子实体中的重金属含量与安全性

杏鲍菇子实体采收后,测定子实体中 4 种重金属的实际含量,并与 GB 7096—2003《食用菌卫生标准》、NY/T 5095—2006《无公害食品 食用菌》2 项标准进行比对,对杏鲍菇子实体的食用安全进行评价,结果见表 6。

在试验浓度范围之内,子实体中 Pb 含量均低于国家标准的限量要求,是安全的。培养料中的 As 添加浓度达到 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,子实体中的 As 含量超出了 2 项标准的限量规定的 2.54 倍。培养料中的 Hg 添加浓度大于等于 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,子实体中的含量大大超标($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最大添加浓度 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,子实体中 Hg 含量超标近 12 倍。子实体中的 Cd 含量随培养料中添加的 Cd 的浓度的增加而增加,当培养料中 Cd 的浓度 $\geq 2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,子实体中的 Cd 含量已经超出限量规定($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最高添加浓度 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,子实体中 Cd 含量超标高达 15.9 倍。

以上结果说明,培养料中的重金属含量过高时,会造成子实体中重金属含量的超标,所以在生产过程中,应严格控制培养料中的重金属污染。

2.5 重金属胁迫对杏鲍菇细胞超微结构的影响

杏鲍菇子实体菌盖细胞形态透射电镜观测结果如图 1 所示。结果表明:CK 细胞通体透明,形态圆润,细胞质较少,细胞壁明显。与 CK 比较,As 处理下细胞变形,细胞壁降解,液泡中发现黑色颗粒聚集体;Pb、Hg 处理下细胞拉长,细胞质、细胞壁中存在黑色颗

表 6 子实体中重金属含量与安全评价

Table 6 Content in fruit body and safety assessment

重金属 Heavy metal	浓度 Concentration/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	子实体中的含量 Content in fruit body/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	GB 7096—2003	NY/T 5095—2006	安全评价 Safety assessment
Pb	CK	<0.01	$\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	✓
	0.1	<0.01			✓
	1	<0.01			✓
	10	<0.01			✓
	100	0.024 ± 0.008			✓
As	CK	<0.01	$\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	✓
	0.05	<0.01			✓
	0.5	<0.01			✓
	5	0.183 ± 0.069			✓
	50	1.270 ± 0.246			!
Hg	CK	0.001	$\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	✓
	0.01	0.005 ± 0.001			✓
	0.1	0.066 ± 0.025			✓
	1	0.307 ± 0.021			!
	10	1.193 ± 0.302			!
Cd	CK	0.065	$\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	✓
	0.02	0.025 ± 0.003			✓
	0.2	0.066 ± 0.003			✓
	2	0.660 ± 0.130			!
	20	3.187 ± 0.514			!

注:✓为安全;!为超标。

Note:✓ means safe;! means exceeding.

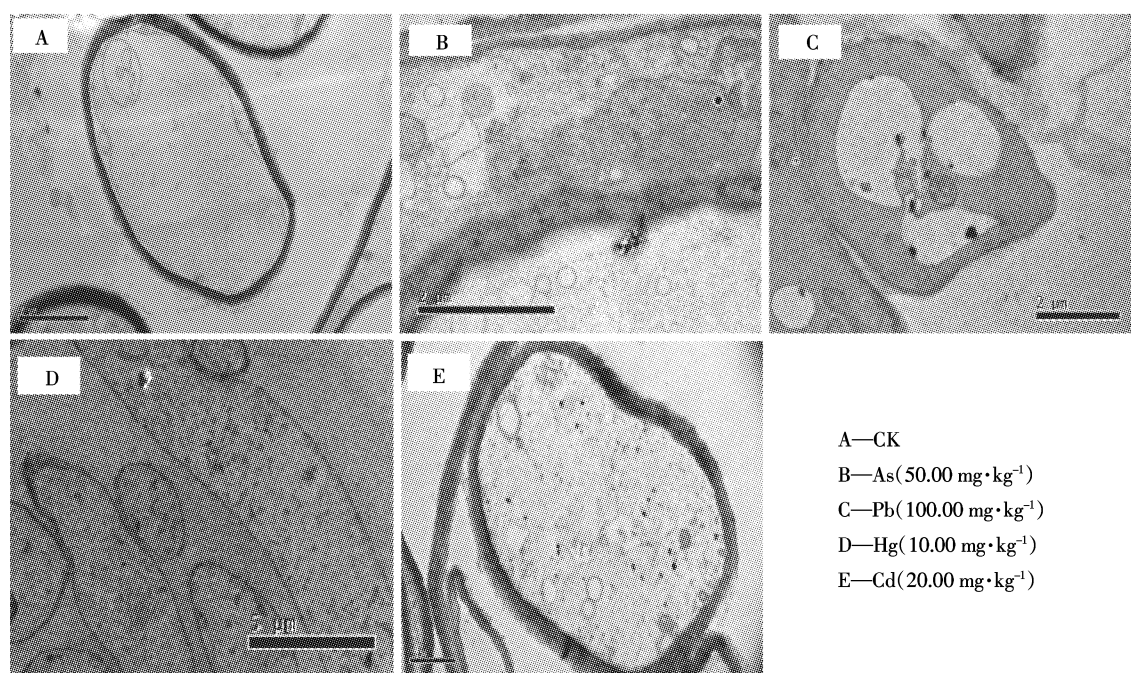


图1 富集不同重金属的杏鲍菇菌盖细胞

Figure 1 Cells of pileus under different heavy metal treatments

粒;Cd处理下的细胞,细胞质中存在黑色颗粒。总体来说,各重金属处理下的细胞质较CK浓稠,且细胞壁与细胞质中存在黑色颗粒,液泡中也能发现明显的黑色颗粒聚集体。

杏鲍菇子实体菌柄细胞形态的变化如图2所示。与CK比较,As处理下的细胞壁降解;Pb处理的细胞变形成月牙形;Cd处理下的细胞,细胞壁与细胞质中充斥着黑色颗粒。观察过程中发现,产生胞间连丝的

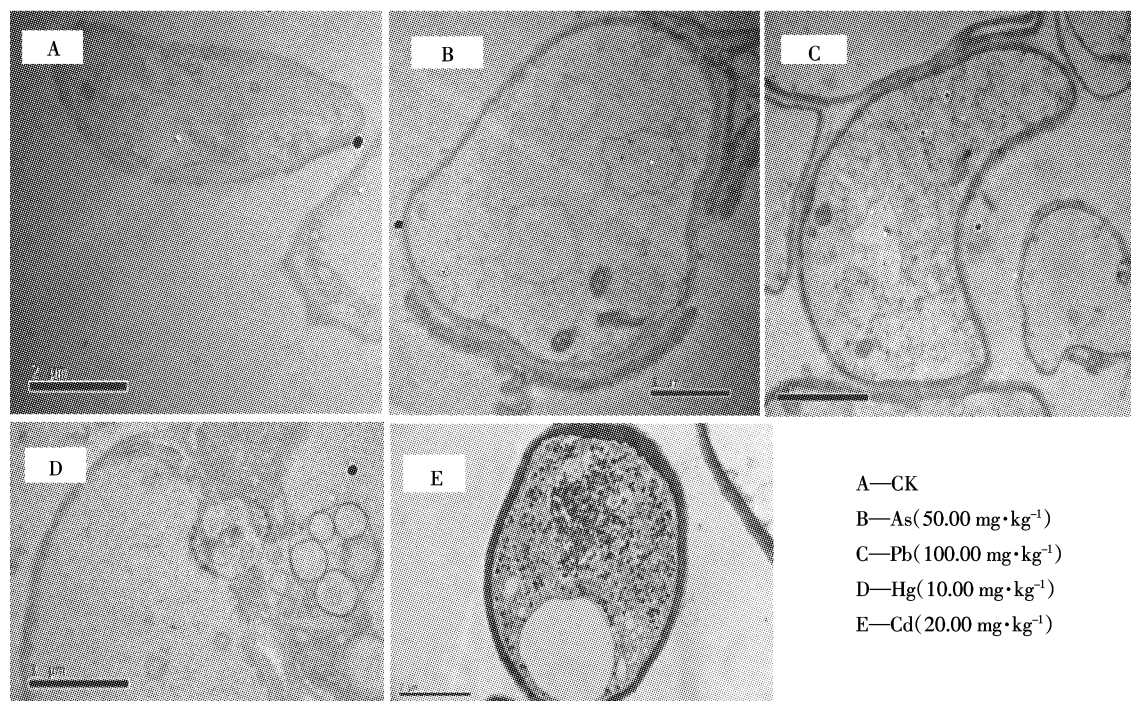


图2 富集不同重金属的杏鲍菇菌柄细胞

Figure 2 Cells of stipe under different heavy metal treatments

细胞(图2中Hg处理)能明显观察到细胞壁上颗粒状的黑色异物。

3 讨论

3.1 不同重金属处理对杏鲍菇生长发育的影响

根据前人的研究^[11-13],培养料中高浓度的As、Hg、Cd都会对杏鲍菇菌丝生长产生抑制作用,而培养料中的Pb会刺激杏鲍菇菌丝的生长。本试验结果表明,培养料中添加一定浓度的Hg、Cd会对杏鲍菇的菌丝生长产生抑制作用,菌丝生长速度均低于空白对照,这一结果与曲明清等研究结果相似。不同之处在于,As在 $5\sim 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的浓度对杏鲍菇菌丝生长不产生抑制作用,甚至刺激菌丝生长,添加As的处理比其他处理出菇早。分析其原因可能是使用的杏鲍菇菌种不同,不同菌种对同一种重金属的富集作用是不同的。本研究还表明,添加Pb、As、Hg、Cd 4种重金属后,杏鲍菇子实体性状包括菌柄平均长度、菌柄平均直径和菌盖平均直径等均有一定程度的改变,且发现杏鲍菇对这4种重金属有很好的耐受性,即添加较高浓度杏鲍菇仍然能够正常生长发育,这与李开本等^[7]对姬松茸富集Cd特性的研究结果基本一致。其原因在于,同一种食用菌有富集不同重金属的特性,并且对不同的重金属有不同的耐受度。但是,食用菌的这一特性对生产和提高产品品质(主要是食用安全性)极为不利。

3.2 不同重金属处理对杏鲍菇子实体产量等生物学特性的影响

本研究发现,培养料中的Pb、As、Hg、Cd对杏鲍菇子实体产量和生物学效率都会产生影响,与空白对照比较均有所下降。这一结果与曲清明等研究结果类似^[11],即培养料中高浓度的As、Hg、Cd都会显著降低生物学效率。但添加的Pb浓度在 $0.1\sim 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的范围时,杏鲍菇产量和生物学效率并非随培养料中Pb浓度的增加而提高,在添加浓度达 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,产量比对照下降了51.3%,这一结果与曲清明等研究结果不一致^[11]。可能原因是不同的杏鲍菇菌种,对同一种重金属Pb的吸收存在差异。4种重金属添加处理中,添加As的处理,子实体产量和生物学效率最高,这与菌丝生长试验结果相一致。生物学效率随着重金属添加浓度的升高逐渐降低,这一结果与前人^[11-13]的研究结果存在一定差异,分析原因可能与本试验所使用的杏鲍菇菌种、培养料成分、栽培条件等因素综合作用有关,还有待进一步证实。

此外,从重金属胁迫下食用菌子实体细胞显微结构来看,本研究中,重金属污染对杏鲍菇子实体的细胞结构产生了一定破坏,包括细胞变形、细胞壁溶解等。但其破坏程度与植物相比较轻^[14-16],这可能与杏鲍菇对重金属的高耐受性有关。而在细胞质中、细胞壁上、液泡膜上都出现黑色颗粒,这些黑色颗粒可能是细胞壁上的活性基团(如巯基、羧基、羟基等)与重金属离子发生定量化合反应(如离子交换、配位结合或络合等)产生;或者是物理性吸附或形成无机沉淀而将重金属污染物沉积在自身细胞壁上。细胞通过螯合作用吸附重金属已被证明和真菌细胞壁结构有关,如细胞壁的多孔结构使活性化学配位体在细胞表面合理排列并易于和金属离子结合。胞壁多糖可提供氨基、羧基、羟基、醛基以及硫酸根等官能团,它们与金属离子有着较强的络合能力。当细胞壁上的这些结合点达到饱和时,重金属离子不可避免的进入细胞质中,此时关键性的机制应该是由细胞质内存在的一些金属硫蛋白。

4 结论

在试验设置的浓度范围内,添加外源Pb、Hg、Cd的处理对杏鲍菇菌丝生长均产生抑制作用,低浓度的As可能会促进菌丝生长,甚至促进杏鲍菇提早出菇。

添加Pb、As、Hg、Cd 4种重金属后,杏鲍菇子实体性状包括菌柄平均长度、菌柄平均直径和菌盖平均直径等均有一定程度的改变,菌柄平均长度和直径都有不同程度的减小,菌盖的平均直径也有所下降,但是与对照比较,不存在显著性差异。

一定浓度的重金属处理下,杏鲍菇子实体产量及生物学效率显著降低。杏鲍菇对本研究中几种重金属的耐性指数从高到低排列为 $\text{As}>\text{Cd}>\text{Pb}>\text{Hg}$ 。

添加一定浓度的重金属可导致杏鲍菇细胞变形、细胞壁溶解,且细胞质中形成大量黑色颗粒状结晶异物。

综合以上结果,培养料中重金属浓度过高,会导致杏鲍菇生长发育不良,产量下降,以及子实体中重金属含量超标,影响菇农生产效益和消费者的身心健康,因此生产中应严格控制培养料中的重金属污染。

参考文献:

- [1] 徐承水. 环境中有害微量元素对人体健康的影响[J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(10):1-3.
XU Cheng-shui. Effects of pernicious trace elements on human health

- [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6(10):1-3.
- [2] Malinowska E, Szefer P, Falandysz J. Metals bioaccumulation by bay bolete, *Xerocomus badius*, from selected sites in Poland[J]. *Food Chemistry*, 2004, 3:405.
- [3] 谢宝贵, 刘洁玉. 重金属在三种食用菌中的累积及对其生长的影响[J]. 中国食用菌, 2005, 24(2):35-38.
XIE Bao-gui, LIU Jie-yu. Effects of heavy metals of Pb, Cd, Hg and As on the growth of three edible fungus [J]. *Edible Fungi of China*, 2005, 24(2):35-38.
- [4] Hatvani N, Mecs I. Effects of certain heavy metals on the growth, dye decolorization, and enzyme activity of *Lentinula edodes*[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2003, 55(2):199-203.
- [5] Garcia M A, Alonso J, Fernandez M I, et al. Lead content in edible wild mushrooms in northwest Spain as indicator of environmental contamination[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1998, 34(4):330-335.
- [6] Sesli E, Tüzen M. Levels of trace elements in the fruiting bodies of macrofungi growing in the East Black Sea region of Turkey[J]. *Food Chemistry*, 1999, 65:453-460.
- [7] 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 preliminary study on character of agaricus blazei enrichment cadmium[J]. *Acta Edulis Fungi*, 1999, 6(1):55-57.
- [8] Mandic M L, Grgic J, Grgic Z, et al. The natural levels of aluminium, cadmium and lead in wild mushrooms in Eastern Croatia [J]. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 1992, 88:76-77.
- [9] Petr Baldrian. Intraspecific variability in growth response to cadmium of the wood-rotting fungus[J]. *Piptoporus Betulinus Mycologia*, 2002, 94(3):428-436.
- [10] Hatvani N, Mecs I. Effects of certain heavy metals on the growth, dye decolorization, and enzyme activity of *Lentinula edodes* [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2003, 55(2):199-203.
- [11] 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 Ming-qing, XING Zeng-tao, CHENG Ji-hong, et al. Effect of heavy metal-containing substrates on the yield and quality of *Pleurotus eryngii* fruit bodies[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2006, 13(2):53-56.
- [12] Michelot D, Siobud E, Christophe J Dore, et al. Update on metal content profiles in mushrooms—toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation[J]. *Toxicol*, 1998, 36(12):1997-2012.
- [13] Melgar M J, Alonso J, Perelopez M. Influence of some factors in toxicity and accumulation of cadmium from edible wild macro-fungi in north-west Spain[J]. *Environ Sci Health*, 1998, 33(4):439-455.
- [14] 周守标, 王春景, 等. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力[J]. 生态学报, 2007, 27(1):281-287.
ZHOU Shou-biao, WANG Chun-jing, et al. Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1):281-287.
- [15] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1):92-99.
JIANG Xing-yu, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2001, 7:92-99.
- [16] 徐信兰, 陈少微, 胡晓颖, 等. 重金属污染对植物超微结构的影响[J]. 电子显微学报, 2006, 25:257-258.
XU Xin-lan, CHEN Shao-wei, HU Xiao-ying, et al. Heavy metal pollution on plant ultrastructure[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2006, 25:257-258.