

刘朋虎, 李波, 江枝和, 等. 姬松茸菌株 J₁ 与 J₇₇ 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 J₇₇ of *Agaricus brasiliensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 863–868.

姬松茸菌株 J₁ 与 J₇₇ 镉富集差异及生理响应机制

刘朋虎¹, 李波², 江枝和³, 王义祥⁴, 翁伯琦^{4*}

(1. 福建农林大学国家菌草工程技术研究中心, 福州 350002; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 3. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 4. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要:以姬松茸菌株 J₁ 及其诱变菌株 J₇₇ 为材料, 研究不同浓度镉对 J₁、J₇₇ 菌丝生长与产量、镉富集量及相关氨基酸含量等的影响, 分析 J₁、J₇₇ 对镉吸收与耐受性差异及生理响应机制。结果表明: 随着外源添加镉浓度的增加, J₁、J₇₇ 菌丝生长速度、产量均先增加后降低, 低浓度镉能促进姬松茸生长、提高产量; 相同浓度外源镉胁迫下, J₇₇ 菌丝及子实体中镉含量均低于 J₁, 且差异显著 ($P < 0.01$), J₇₇ 为低富集镉的菌株; 菌丝中镉含量与子实体中镉含量显著正相关 ($R^2 > 0.97$); J₁、J₇₇ 子实体中半胱氨酸含量均先降低后增加, 低浓度镉胁迫下 J₁ 半胱氨酸含量较高, 高浓度镉胁迫下 J₇₇ 中半胱氨酸含量较高, 半胱氨酸可能与姬松茸镉富集密切相关。

关键词: 姬松茸; 镉; 富集; 重金属

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)05-0863-06 doi:10.11654/jaes.2017-0073

Comparison and physiological mechanisms of cadmium (Cd) accumulation by strain J₁ and mutant J₇₇ of *Agaricus brasiliensis*

LIU Peng-hu¹, LI Bo², JIANG Zhi-he³, WANG Yi-xiang⁴, WENG Bo-qi^{4*}

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

Abstract: *Agaricus brasiliensis* is an edible and medicinal mushroom with a strong capability of cadmium accumulation, which may impact food security. Using a combination of ⁶⁰Co-γ ray and UV light, we previously bred a new *A. brasiliensis* strain named J₇₇ by irradiating mycelium of strain J₁. Owing to its low Cd content and high stable yield, J₇₇ was approved as a new variety named Fuji 77 by the Crop Variety Approval Committee of Fujian Province in 2013. Using the *A. brasiliensis* strain J₁ and its mutant J₇₇ as research materials, the effects of Cd in different concentrations on mycelium growth rate and yields, Cd accumulation and contents of three amino acids in mycelium, and fruiting bodies of J₁ and J₇₇ were analyzed by adding different concentrations of Cd into the culture medium to reveal the differences in Cd uptake, tolerance, and physiological response mechanisms between J₁ and J₇₇. The results showed that mycelium growth rate and yields of J₁ and J₇₇ increased first and then declined with the increase of Cd concentration, which indicated that Cd of lower concentrations could promote the growth of mycelium and increase the yields. Under the same concentration of Cd, Cd contents in both mycelium and fruiting body of J₇₇ were significantly lower than those of J₁, which indicated that J₇₇ was a lower Cd accumulative strain. In addition, there was a significant positive

收稿日期: 2017-01-13

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); 福建省中青年骨干教师教育科研项目(JA13108); 福建省菌草生态产业协同创新中心攻关项目(K80DN8002-JCXTG16)

Project supported: The Natural Science Foundation of Fujian Province(2015J01077); Foundation for Young and Middle-aged Teacher of Fujian Education Department(JA13108); Key Subject of Cooperation Innovation Center of JUNCAO Ecological Industry of Fujian Province(K80DN8002-JCXTG16)

correlation between Cd contents in mycelium and fruiting bodies ($R^2>0.97$). Cysteine (Cys) contents in both fruiting bodies of J_1 and J_{77} decreased first and then increased with the increase of Cd concentrations. Cys content was significantly higher in fruiting body of J_1 compared with J_{77} under lower Cd concentrations. In contrast, the Cys content in the fruit body of J_{77} was significantly higher than that of J_1 under higher Cd concentrations. These results indicated that Cys might play an important role in Cd accumulation in *A. brasiliensis*.

Keywords: *Agaricus brasiliensis*; cadmium (Cd); accumulation; heavy metal

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。1992年, 福建省农业科学院从日本引进姬松茸并栽培成功^[1]。经过30多年的发展, 我国已经成为世界上姬松茸主要产地之一^[2]。姬松茸具有杏仁的香味, 高蛋白、低脂肪, 富含纤维素和矿物质元素, 是一种营养价值丰富的食品^[3]。且随着研究的深入, 研究人员发现姬松茸菌丝和子实体中含有多糖、核酸、类固醇、凝集素等多种活性成分, 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^[4-5]。

姬松茸产业发展潜力巨大, 但是其菌丝对镉有很强的富集能力, 造成子实体中镉极易超标, 危害食品安全及出口创汇。镉是毒性很强的重金属元素之一, 可以蓄积于人的肾、肝等器官中, 严重危害人类健康。据报道, 姬松茸子实体中镉含量远远高于培养料镉含量, 也远远高于其他重金属^[6-7]。子实体中镉含量超标已成为影响姬松茸产业健康发展的一个重要因素。研究表明, 不同的姬松茸菌株对镉富集能力差异显著^[8-11]。所以筛选或者选育低富集镉的姬松茸菌株是解决姬松茸镉超标的有效方法之一。

本课题组前期以福建省农业科学院从日本引进的菌株 J_1 (福建省主栽品种之一) 为出发菌株, 利用辐射诱变技术选育到一株高产姬松茸新菌株 J_{77} , 其子实体中镉含量显著降低^[12]。本研究以添加外源镉的形式研究了不同浓度镉胁迫对 J_1 、 J_{77} 菌丝生长、产量的影响, J_1 、 J_{77} 对镉的富集规律及差异。另据报道, 真菌中半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸与镉的解毒密切相关^[13], 因此本研究还测定了不同浓度镉胁迫下 J_1 、 J_{77} 子实体中与镉富集密切相关的这3种氨基酸含量的变化规律。本研究为进一步深入研究菌株 J_{77} 低镉富集机制奠定基础, 同时也为低富集镉姬松茸菌株选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 菌株

本研究供试菌株为姬松茸菌株 J_1 与 J_{77} , 均保藏于福建农林大学国家菌草工程技术研究中心。

1.2 试验设计

本试验分2个部分: (1) 不同浓度镉对 J_1 、 J_{77} 菌丝生长的影响。在PDA优化固体培养基及液体培养基中加入一定浓度梯度的外源镉, 使添加外源镉的浓度分别为0、0.5、1、1.5、2、2.5、5、10、15、20、25、50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别测定2个菌株在不同浓度镉胁迫下菌丝生长速度、菌丝鲜量、菌丝中镉含量, 分析2个菌株对镉富集及耐受性差异; (2) 不同浓度镉对 J_1 、 J_{77} 子实体生长发育的影响。在培养料中加入一定浓度梯度的外源镉, 使添加外源镉的浓度分别为0、0.5、1、1.5、2、2.5、5、10、15、20、25、50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别测定2个菌株在不同浓度镉胁迫下的产量、子实体中镉含量及与镉富集密切相关的半胱氨酸、甘氨酸、谷氨酸含量, 分析2个菌株之间的差异。

1.3 不同浓度镉对 J_1 、 J_{77} 菌丝生长的影响

1.3.1 对菌丝生长速度的影响

PDA优化培养基: 马铃薯230 g, 蔗糖20 g, 磷酸二氢钾2 g, 硫酸镁0.5 g, 维生素B₁ 10 mg, 琼脂粉20 g, 蒸馏水1 L, pH自然。

镉母液配制: 称取2.0314 g $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, 溶于蒸馏水并定容于1 L容量瓶中, 母液镉浓度为1 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

将镉母液替换部分PDA优化培养基中的水, 配制成含有不同浓度镉的培养基 (浓度见1.2), 灭菌后无菌条件下倒于培养皿上。先将菌种接种于培养皿上, 28℃培养, 待菌落直径4~6 cm时, 在同一直径的圆圈上用打孔器打出相同的菌丝块, 接种于含有镉的培养皿上, 28℃培养, 采用平板划线法测定菌丝的生长速度^[14], 每个处理4个平行。

1.3.2 对菌丝鲜重影响

与平板处理相同, 将不含琼脂PDA优化培养基与镉母液配制不同镉浓度培养基, 分装于三角瓶中, 高压灭菌后接种, 于28℃静置培养30 d, 过滤称取菌丝鲜重, 并测定菌丝中镉含量。

1.4 不同浓度镉对 J_1 、 J_{77} 子实体发育的影响

培养料配方: 棉籽壳20%, 玉米芯12.5%, 牛粪35%, 麸皮10%, 稻草20%, CaCO_3 1%, 石灰1.5%。

栽培方法: 采用熟料袋栽方式出菇。将配方中各

种培养料混合均匀,按 1:1.25 的比例计算加水量,先按试验设计将不同镉母液加入到水中,再将水与培养料混合均匀;混合均匀的培养料分装到聚丙烯袋中,每袋装料 0.8 kg,放入高压灭菌锅中,121 ℃灭菌 2 h,接种后在 26 ℃恒温培养室中培养,待菌丝走满袋后,移到栽培室,开袋覆土。每个菌株每个处理设 20 个重复。覆土后 15 d 左右即有菇蕾出现,出菇后统计不同浓度镉胁迫下 2 个菌株的产量,同时测定不同处理子实体中镉含量及半胱氨酸、甘氨酸、谷氨酸含量,计算镉的富集系数。

1.5 测定方法

镉含量采用火焰原子吸收法进行测定^[15],氨基酸含量采用《食品中氨基酸测定》(GB/T 5009.124—2003)方法进行^[16]。

1.6 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 对数据进行分析和处理,用 *T* 检验对 2 个菌株之间差异性进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度镉对 J₁、J₇₇ 菌丝生长的影响及菌丝对镉的富集规律

随着外源添加镉浓度的增加,J₁ 和 J₇₇ 菌丝生长速度均呈现先增加后减少的规律,与之对应的菌丝鲜重也呈现先增加后减少的趋势(图 1)。菌株 J₁ 在添加外源镉浓度为 1.5 mg·L⁻¹ 时菌丝生长速度最快,而 J₇₇ 在添加外源镉浓度为 2 mg·L⁻¹ 时菌丝生长速度最快;J₁ 在添加外源镉 1 mg·L⁻¹ 时菌丝鲜重最大,J₇₇ 在添加外源镉 2 mg·L⁻¹ 时菌丝鲜重最大。从菌丝中镉含量及镉富集系数来看(表 1):随外源镉浓度的增加,J₁、J₇₇ 菌丝中镉含量均增加;J₁ 菌丝对镉富集系数在 180~310 之间,在外源镉为 2 mg·L⁻¹ 时,富集系数最高;J₇₇

菌丝对镉富集系数在 113~193 之间,在外源镉为 25 mg·L⁻¹ 时,富集系数最高;相同外源镉浓度下 J₁ 菌丝中镉含量高于 J₇₇。

2.2 不同浓度镉胁迫下 J₁、J₇₇ 产量及子实体中镉含量

在培养料中添加一定浓度梯度的镉,出菇后收集子实体,测定不同浓度镉对 J₁、J₇₇ 产量的影响及子实体中镉的含量。产量统计结果表明(图 2):随着外源镉浓度的增加,J₁ 和 J₇₇ 产量均先增加后减少;且 2 个菌株均在 1 mg·kg⁻¹ 时产量最高。子实体中镉含量检测表明(表 2):随镉浓度的增加,J₁、J₇₇ 中镉含量逐渐增加,对镉富集系数逐渐减少;J₁ 对镉的富集系数为 24~58,J₇₇ 对镉富集系数为 19~45;在相同浓度下,J₁ 子实体中镉的浓度均高于 J₇₇,且差异达到显著或极

表 1 不同浓度镉胁迫下 J₁、J₇₇ 菌丝中镉含量及富集系数
Table 1 Effect of Cd in different concentration on Cd content and enrichment coefficient of J₁ and J₇₇ mycelium

添加外源镉浓度 Different concentrations of Cd added into culture medium/mg·L ⁻¹	菌丝中镉含量 Cd contents in mycelium/ mg·kg ⁻¹		镉富集系数 Enrichment coefficient of Cd	
	J ₁	J ₇₇	J ₁	J ₇₇
0	5.6±0.6	3.1±0.4**		
0.5	111.6±8.4	85.5±1.7**	223	171
1	224.8±2.3	158.9±4.4**	225	159
1.5	415.8±19.4	191.4±4.7**	277	128
2	620.8±20.2	231.3±4.5**	310	116
2.5	708.1±18.2	281.4±2.8**	283	113
5	921.3±23.7	623.0±77.7**	184	125
10	2 469.0±69.3	1 462.2±51.1**	246	146
15	2 720.6±43.6	2 640.1±43.2*	181	176
20	3 602.8±51.8	2 909.7±45.3**	180	145
25	5 390.3±74.0	4 813.7±89.2**	216	193
50	12 899.1±229.6	5 665.3±91.7**	258	113

注:“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著,下同。

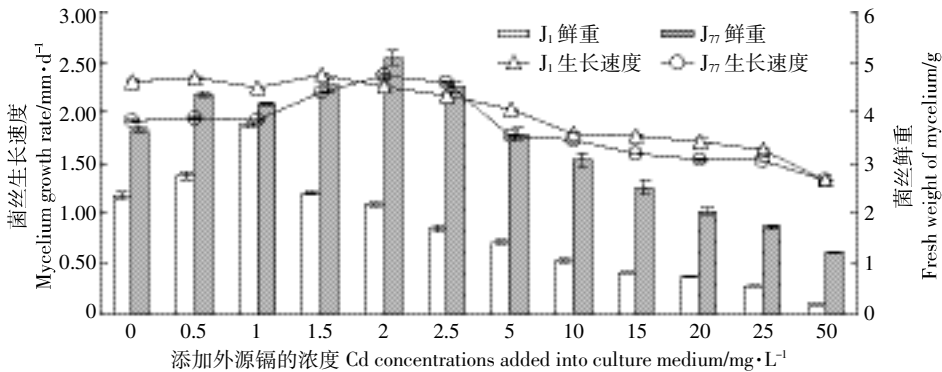


图 1 镉对 J₁、J₇₇ 菌丝生长的影响

Figure 1 Effect of Cd in different concentration on mycelium growth rate of J₁ and J₇₇

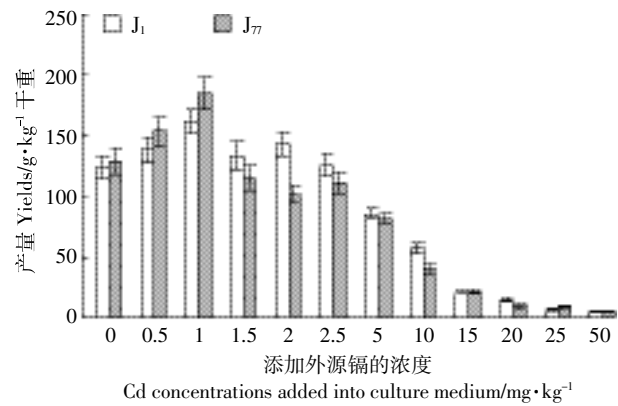


图2 镉对J₁、J₇产量的影响

Figure 2 Effect of Cd in different concentration on yields of J₁ and J₇

显著水平,J₇对镉富集显著降低。

对J₁、J₇菌丝和子实体中镉含量相关性进行分析,结果表明:J₁菌丝与子实体中镉含量相关系数为0.996,差异极显著;J₇菌丝与子实体中镉含量相关系数为0.971,差异极显著。此结果表明菌丝中镉含量与子实体中镉含量显著正相关,菌丝对镉的吸收能力影响子实体中的镉含量。

2.3 不同浓度镉胁迫对J₁、J₇中与镉富集相关的氨基酸含量的影响

本研究测定了不同浓度镉胁迫下J₁、J₇子实体中半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸含量的变化。半胱氨酸检测结果表明(图3):随着外源镉浓度的增加,菌株J₁

和J₇半胱氨酸的含量均表现为先减少后增加的规律;J₁中半胱氨酸含量变化幅度较小,J₇中半胱氨酸含量变化幅度较大,当外源镉浓度在25 mg·kg⁻¹以上时J₇中半胱氨酸含量急剧上升;在2 mg·kg⁻¹以下J₁中半胱氨酸含量大于J₇中的含量,且差异极显著;在15 mg·kg⁻¹以上时,J₇中半胱氨酸含量大于J₁中的含量,且差异极显著。

甘氨酸检测结果表明(图4):不同外源镉处理下,J₁、J₇子实体甘氨酸含量变化较小;添加外源镉浓度在0.5~2.5 mg·kg⁻¹之间时,J₁中甘氨酸含量大于J₇中含量,而在5~50 mg·kg⁻¹之间,J₁、J₇子实体中甘氨酸含量无明显规律。

谷氨酸检测结果表明(图5):在相同浓度外源镉胁迫下,J₁、J₇子实体谷氨酸含量变化较小;0.5~2.5 mg·kg⁻¹之间,J₁中谷氨酸含量大于J₇中含量,而在5~50 mg·kg⁻¹之间,J₁、J₇子实体中甘氨酸含量无明显规律。

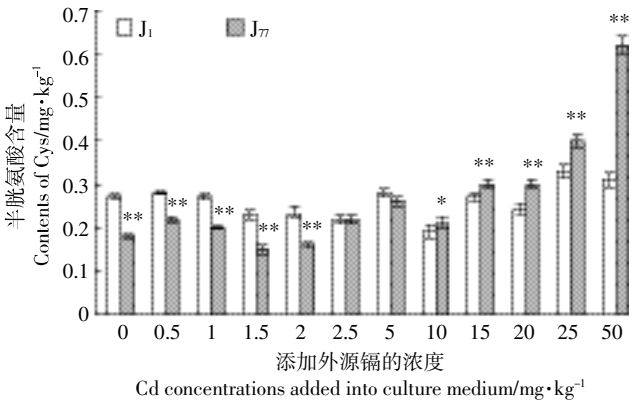


图3 镉对J₁、J₇子实体半胱氨酸含量的影响

Figure 3 Effect of Cd in different concentration on Cys contents of J₁ and J₇ fruiting bodies

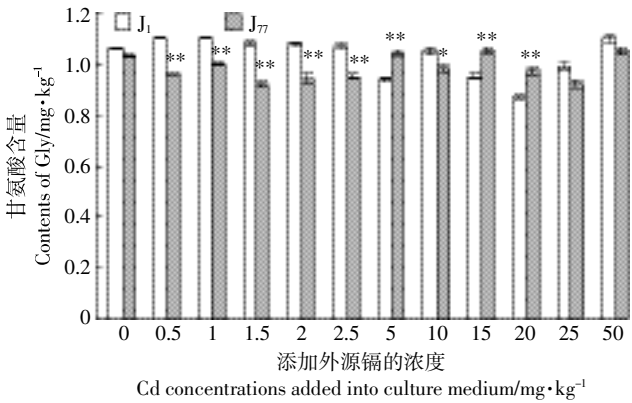
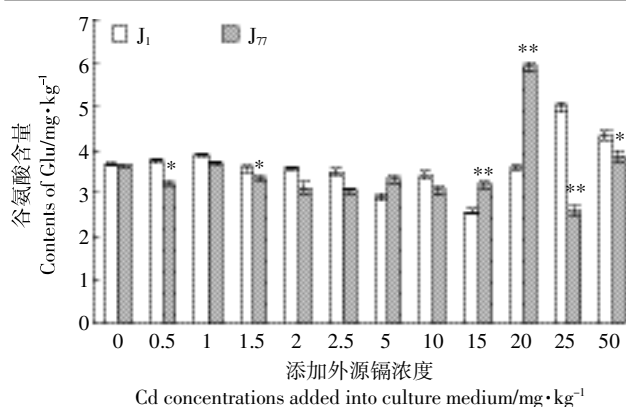


图4 镉对J₁、J₇子实体甘氨酸含量的影响

Figure 4 Effect of Cd in different concentration on Gly contents of J₁ and J₇ fruiting bodies

表2 不同浓度镉胁迫下J₁、J₇子实体中镉含量及富集系数
Table 2 Effect of Cd in different concentration on Cd content and enrichment coefficient of J₁ and J₇ fruiting bodies

添加外源镉浓度 Different concentrations of Cd added into culture medium/mg·kg ⁻¹	子实体中镉含量 Cd content in fruiting bodies/ mg·kg ⁻¹		镉富集系数 Enrichment coefficient of Cd	
	J ₁	J ₇	J ₁	J ₇
0	6.5±1.0	5.1±0.3*		
0.5	29.2±0.2	22.5±0.7**	58	45
1	45.7±0.4	36.3±3.0**	46	36
1.5	72.8±1.8	52.6±1.7**	49	35
2	92.5±0.4	68.1±3.9**	46	34
2.5	105.8±0.8	81.8±5.7**	42	33
5	169.9±8.8	155.2±11.5*	34	31
10	313.0±17.8	264.6±40.2**	31	26
15	409.1±14.7	336.6±20.5**	28	22
20	538.8±45.9	420.4±66.0**	27	21
25	606.7±21.9	546.6±35.4**	24	21
50	1 619.7±82.6	958.5±26.3**	32	19

图5 镉对J₁、J₇₇子实体谷氨酸含量的影响Figure 5 Effect of Cd in different concentration on Glu contents of J₁ and J₇₇ fruiting bodies

显规律。进一步分析J₁、J₇₇子实体中甘氨酸与谷氨酸含量,发现二者变化规律一致。

3 讨论

姬松茸菌丝对镉有很强的富集能力,已经引起越来越多学者的关注,但是其机理还不甚清楚^[17]。本课题组前期以菌株J₁为出发菌株,经过⁶⁰Co-γ射线诱变,获得一株低富集镉的新菌株J₇₇。本研究在此基础上,采用添加外源镉的方法,进一步研究了J₁、J₇₇对镉吸收与耐受性的差异,并对两个菌株中与镉富集密切相关的氨基酸含量进行检测,初步揭示了J₇₇低富集镉的生理机制,为进一步深入研究分子机理奠定了基础。

随着镉浓度增加,J₁和J₇₇菌丝生长速度均表现为先增加后减少的趋势,表明低浓度的镉能够促进姬松茸菌丝生长,这与以前报道一致^[18]。在添加不同浓度外源镉处理下,J₇₇菌丝体与子实体中镉含量均低于J₁,表明J₇₇菌丝对镉吸收较少,导致菌丝及子实体中镉含量较低,J₇₇为低富集镉的菌株。从菌丝与子实体镉含量相关性分析结果来看,J₁和J₇₇菌丝与子实体中镉含量相关性均为极显著(97%以上),说明采用添加外源镉的形式液体培养菌丝可以作为初步筛选低镉姬松茸菌株的方法。

真菌中普遍存在对金属离子具有亲和能力的蛋白质(肽),称为金属硫蛋白(MT),可以结合进入细胞内的重金属离子,使其以不具有生物活性的无毒的螯合物形式存在,降低金属离子的活性,从而减轻金属离子对细胞的毒害作用。相关研究表明,在食用菌中的金属硫蛋白通常由半胱氨酸、谷氨酸和甘氨酸等3种氨基酸组成^[19]。李开本等^[6]研究表明,巴西蘑菇子实

体中谷氨酸、胱氨酸及甘氨酸等构成富镉多肽的三种主要氨基酸含量均明显高于双孢蘑菇。江启沛^[19]分析姬松茸富镉的原因之一是细胞内特异的与Cd²⁺结合的谷氨酸含量高,并发现Cd²⁺结合蛋白的存在。江枝和等^[20]用灰色系统理论分析了姬松茸子实体中17种氨基酸含量与重金属镉含量的关系,结果表明:半胱氨酸含量与镉含量的关联系数最大,谷氨酸含量与金属镉含量两者关联系数最小^[20]。本研究结果表明,随着镉浓度增加,两个菌株中半胱氨酸含量呈明显规律性,且高浓度镉胁迫下,J₇₇中半胱氨酸显著增加,表明半胱氨酸可能对姬松茸解毒具有重要作用。

4 结论

J₁、J₇₇菌株对镉富集具有明显差异性,J₇₇为低富集镉的菌株;菌丝中镉含量与子实体中镉含量显著正相关,采用菌丝液体培养的方法可以初步筛选低镉菌株;半胱氨酸的含量可能与姬松茸镉富集有关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Largeteau M L, Llerena-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.
- [3] Firenzuoli F, Gori L, Lombardo G. The medicinal mushroom *Agaricus blazei* Murrill: Review of literature and pharmacotoxicological problems[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2008, 5(1):3-15.
- [4] 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, 2013:842619.
- [5] 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.
- [6] 李开本, 陈体强, 徐洁. 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. A primary study on the Cd-enrichment characteristics of *Agaricus blazei* Murrill[J]. *Acta Edulis Fungi*, 1999, 6(1):55-57.
- [7] Györfi J L, Geösel A, Vetter J. Mineral composition of different strains of edible medicinal mushroom *Agaricus subrufescens* Peck[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2010, 13(6):1510-1514.
- [8] 黄建成, 应正河, 余应瑞, 等. 姬松茸对重金属的富集规律及控制技术[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(3):406-409.

- HUANG Jian-cheng, YING Zheng-he, YU Ying-rui, et al. Accumulation rule of heavy metal and the controlling technique by *Agaricus blazei* Murrill[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3):406-409.
- [9] 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.
- [10] 林戎斌. 镉在姬松茸生产中迁移、分布规律及降低镉含量措施的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2011.
- LIN Rong-bin. Study on transportation, distribution and reduction of cadmium in *Agaricus blazei* Murrill[D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [11] 陈 芬, 赵晓燕, 邢增涛, 等. 姬松茸不同品种间的差异比较[J]. 食用菌学报, 2015, 22(1):26-29.
- CHEN Fen, ZHAO Xiao-yan, XING Zeng-tao, et al. Levels of selected components in fruit bodies of four *Agaricus blazei* Strains[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2015, 22(1):26-29.
- [12] 刘朋虎, 江枝和, 雷锦桂, 等. ^{60}Co 与紫外复合诱变选育姬松茸新品种福姬 77[J]. 核农学报, 2014, 28(3):365-370.
- LIU Peng-hu, JIANG Zhi-he, LEI Jin-gui, et al. Breeding of a new variety of *Agaricus blazei* 'Fuji 77' by ^{60}Co combining with UV mutagenesis[J]. *Journal of Nuclear Agriculture Sciences*, 2014, 28(3):365-370.
- [13] 张晓柠, 兰 进. 食药两用菌重金属富集机理及应用研究进展[J]. 时珍国医国药, 2006, 17(12):2593-2594.
- ZHANG Xiao-ning, LAN Jin. Research progress on mechanism and application of heavy metals enrichment of edible and medicinal Fungi [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2006, 17(12):2593-2594.
- [14] 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 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.
- [15] Tang H, Li T, Yu H, et al. Cadmium accumulation characteristics and removal potentials of high cadmium accumulating rice line grown in cadmium-contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(15):15351-15357.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009. 124—2003 食品中氨基酸的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health of PRC. GB/T 5009. 124—2003 Determination of amino acids in foods[S]. Beijing:China Standards Press, 2003.
- [17] Wang L L, Li H B, WEI H, et al. Identification of cadmium-induced *Agaricus blazei* genes through suppression subtractive hybridization[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2014, 63:84-90.
- [18] 杨春香. 镉对姬松茸菌丝生长的影响[D]. 福州:福建师范大学, 2004.
- YANG Chun-xiang. Effects of cadmium on the mycelia growth of *Agaricus blazei* Murrill[D]. Fuzhou:Fujian Normal University, 2004.
- [19] 江启沛. 药食两用菌姬松茸富镉特性及其拮抗抑制研究[D]. 保定:河北农业大学, 2003.
- JIANG Qi-pei. Studies on the characteristic of Cd-enrichment of *Agaricus blazei* Murrill and its prevention & control[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2003.
- [20] 江枝和, 翁伯琦, 王义祥, 等. 利用灰色系统分析姬松茸子实体中氨基酸含量与镉含量的关系[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1259-1261.
- JIANG Zhi-he, WENG Bo-qi, WANG Yi-xiang, et al. Grey-System-Theory analysis of relation between Cd contents and amino acids contents in *Agaricus blazei* Murrill's fruitbodies[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(6):1259-1261.