

李春冬,徐伟良,郭 梁.食用菌对重金属吸附作用的研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(5):23-27.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.007

食用菌对重金属吸附作用的研究进展

李春冬¹,徐伟良¹,郭 梁^{1,2}

(1. 锡林郭勒职业学院/锡林郭勒生物工程研究院,内蒙古锡林浩特 026000;

2. 锡林郭勒食品检验检测和风险评估中心,内蒙古锡林浩特 026000)

摘要:食用菌作为一类丰富的微生物资源,可通过吸附环境中的重金属来降低环境污染,其在维持生态平衡中发挥着重要的作用。详细论述食用菌对重金属的吸附作用、吸附机制、耐受机制以及应用进展,以期对食用菌吸附重金属研究和食用菌在环境修复中的应用提供理论参考。

关键词:食用菌;重金属;吸附;机制;应用

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0023-05

食用菌是一类含有高蛋白、低脂肪、多种维生素和微量元素的可以食用的蕈菌。食用菌含有多种活性功能物质(多糖、活性多肽、核苷类和三萜类等),这些活性功能物质在抗肿瘤、增强免疫力、调节血脂、降血糖、保肝解毒等方面发挥着重要作用^[1-4]。食用菌除了具有食用和药用价值外,其对重金属元素具有广泛的吸附特性,能吸附环境中的重金属,从而降低环境污染。食用菌与一般绿色植物相比,对环境中重金属元素吸附有如下优点:(1)食用菌对金属的吸附能力强,对主要重金属铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、砷(As)的吸附能力均高于具有吸附能力的植物;(2)吸附的重金属元素种类多,同种食用菌能吸附多种重金属元素,而植物只能吸附1种或2种重金属元素;(3)食用菌的生长周期短,且子实体易腐化,便于进行后续处理^[5]。因此,食用菌对重金属元素的吸附可以减少重金属污染环境,并为净化环境提供了生态解决方案。

1 食用菌对重金属元素的吸附作用

1.1 不同种类食用菌对重金属的吸附作用

食用菌吸附重金属元素的能力在不同种类、同一个体但不同部位之间均有差异。Chittaragi等通过对红珊瑚菌和紫芝等几种不同种类野生食用菌重金属元素含量进行检测,发现不同属食用菌吸附重金属元素的能力不同^[6]。Sesli等对111个食用菌样品中镉、铅、汞、砷等金属元素的研究表明,口蘑科(Tricholomataceae)真菌重金属元素含量最高^[7]。林佑等通过对在云南省采集的12种野生食用菌中矿物质元素含量进行检测,发现12种食用菌中白牛肝菌的Pb含量最低,鸡枞菌中Pb含量最高,具有显著性差异^[8]。陈琛通过对黑木耳、金针菇、灰树花和香菇的重金属元素进行检测,结果表明,几种食用菌中Pb、Cd、铜(Cu)、铬(Cr)含量之间存在差异^[9]。

Mazurkiewicz等对鸡油菌和高大环柄菇进行重金属元素检测,结果表明,2种食用菌对重金属元素的吸附能力不同^[10]。Mleczeek等通过对在波兰南部采到的12种野生牛肝菌中22种矿物质元素进行含量比较,发现了不同种间食用菌对重金属元素的吸附能力不同^[11]。

杨天伟等通过对不同产地和种类蘑菇富集重金属的能力进行检测,研究结果表明,香菇、鸡腿菇及平菇对镉离子均有不同程度的富集效果^[12]。Garcia等对西班牙西北部采集的13种95个样品进行重金属含量检测,发现不同种属的样本中铅含量存在显著差异^[13]。施巧琴等利用添加Cd²⁺(50 mg/kg)的培养基对不同品种的食用菌进行培养,结果显示,凤尾菇对Cd²⁺的吸附作用最强,其次为香菇,而木耳最弱^[14]。孙希雯等通过研究表明,金针菇富集锌的能力比白木耳强^[15]。雷敬敷等通过对香菇、蘑菇、凤尾菇及木耳这几种食用菌的重金属元素含量进行检测,发现在非污染条件下,食用菌对锌的吸附能力顺序为木耳>凤尾菇>香菇>双孢蘑菇^[16]。杨志孝等通过对黄伞菌、羊肚菌、灵芝及猴头菌等食用菌富集铬的能力进行比较,研究结果表明,羊肚菌和黄伞菌对铬离子的富集能力较强^[17]。

从表1可以看出,常见食用菌对重金属的吸附作用有明显的差异,同一食用菌对重金属的吸附具有选择性;不同食用菌对相同重金属的吸附作用也不同。

1.2 食用菌子实体不同部位吸附重金属的能力

王小平通过对3种不同产地的姬松茸进行元素检测,结果表明,在姬松茸子实体中Cu、Zn、Ag、Cd、Hg的分布并非均匀,其分布一般表现为从菌盖中心到边缘、从菌柄下部到上部含量逐渐增加^[19]。Wang等通过对在云南省不同地点采集到的绒柄牛肝菌的菌盖和菌柄中多种矿物质元素进行检测,研究表明,菌盖对镁(Mg)、Zn、Cd 3种元素吸附含量比对其他矿物质元素的吸附量高,而菌柄对钴(Co)、镍(Ni)元素的吸附量较高^[22]。Zhang等通过对在波兰地区采集的褐疣柄牛肝菌菌柄和菌盖中19种元素含量进行元素检测,发现对应的菌盖中的Cu、铁(Fe)、磷(P)、Pb、Cr、Ag、钾(K)、Co和Zn含量比菌柄中对应的元素元素含量高,而菌柄中的Na含量比菌盖中高^[23]。邢博等对云南省8种野生牛肝菌中的12种矿质

收稿日期:2017-12-26

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(编号:2016BS0317)。

作者简介:李春冬(1997—),男,内蒙古赤峰人,研究方向为食用菌研究与开发。E-mail:lichundongde@163.com。

通信作者:郭 梁,博士,助理研究员,研究方向为利用生物工程技术开发野生动植物和微生物资源等。E-mail:herdman86@163.com。

表 1 常见食用菌子实体对重金属的平均吸附量

食用菌名称	吸附量 (mg/kg)							
	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
木耳 ^[9,16,18]	—	0.070	0.553	0.231	5.260	—	0.823	21.310
灰树花 ^[9]	—	—	0.336	0.366	8.910	—	0.862	—
香菇 ^[18]	—	0.040	1.300	—	—	0.100	0.840	—
姬松茸 ^[19]	738.500	310.300	13.500	257.500	45.600	426.000	86.700	85.700
平菇 ^[16,18]	—	0.030	0.375	—	38.500	0.120	1.220	84.100
鸡腿蘑 ^[18]	—	0.230	0.070	—	—	0.400	1.300	—
金针菇 ^[18]	—	0.070	0.290	—	—	0.040	0.990	—
粉紫香蘑 ^[20]	0.080	—	—	0.580	5.000	—	0.500	31.000
紫丁香蘑 ^[21]	—	—	—	—	37.000	—	<0.01	158.000
杨树口蘑 ^[21]	—	—	—	—	15.000	—	0.600	24.000
红珊瑚菌 ^[6]	—	—	—	—	43.900	—	12.200	57.900
紫芝 ^[6]	—	—	—	—	9.400	—	7.900	65.400
鸡油菌 ^[10]	—	—	—	1.010	38.800	—	—	66.700

注:“—”表示未见报道;表 3 同。

元素含量进行检测,发现菌盖中 As、Cr、Cu、Mg、Zn 这 5 种重金属元素的含量高于菌柄中的含量,研究证明子实体中菌柄与菌盖重金属元素含量存在差异^[24]。何旭孔通过对香菇不同部位的镉元素进行含量检测,菌褶中的镉含量最高,菌盖中其次,而菌柄中镉含量最低^[25]。黄建成等通过对姬松茸菌盖和菌柄中重金属含量的分析测定,发现菌盖中 As、Cd、Hg 含量分别为菌柄的 2.27、2.75、3.75 倍^[26]。杨珍对冬菇不同部位重金属的平均含量进行检测^[27],检测结果见表 2。

表 2 冬菇子实体不同部位对重金属的吸附量比较

冬菇子 实体部位	重金属含量					
	As	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
菌盖	+++	++	++	+++	++	+
菌柄	++	+++	+++	++	+++	+++
菌托	+	+	+	+	+	++

注: + 表示百分比大小; +++ 表示所占百分比最大; ++ 表示中等; + 表示较小。

Mangeles 等试验证明,食用菌子实体的不同部位吸附重金属元素的能力和含量都有差异^[28]。Garcia 等研究发现,鸡

腿菇菌褶中的铅含量平均为 2.06 mg/kg,而其他部分铅含量平均为 2.79 mg/kg^[29]。Malinowska 等对在波兰不同地点采集到的褐绒盖牛肝菌(*Xerocomus badius*)中 14 种重金属元素进行了检测,研究发现,褐绒盖牛肝菌菌盖中的重金属元素浓度高于菌柄中重金属元素的浓度^[30]。李艳艳研究发现,食用菌子实体的菌柄中铅含量大于菌盖和菌褶中的铅含量^[31]。卢娇娇研究发现,菌盖中锌、锰、铁含量均超过菌柄中的含量^[32]。杨天伟等研究表明,牛肝菌菌盖和菌柄中总 Hg 含量具有显著性差异^[12]。Vaaramaa 等对在芬兰森林采集到的野生牛肝菌科真菌进行了元素浓度分析,研究发现牛肝菌科真菌的菌盖中钼元素的浓度高于菌柄中的浓度^[33]。Rudawska 等对 8 种真菌 160 个样本的菌盖和菌柄中的多种重金属进行了元素含量检测,发现在菌盖和菌柄中重金属元素含量分布有差异^[34]。由此可见,食用菌子实体不同部位吸附重金属元素含量有明显差异,这种差异不仅表现在食用菌子实体的不同部位,还体现在不同的重金属种类上。

由表 3 可见,同一食用菌不同部位对重金属的吸附能力不同,表明同一食用菌的不同部位对重金属吸附具有选择性。

表 3 常见食用菌子实体不同部位对重金属离子的平均吸附量

食用菌种类	部位	吸附量 (mg/kg)							
		Ag	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
姬松茸 ^[19]	菌盖	1.40	—	21.10	—	95.00	285.50	108.00	137.30
	菌柄	0.90	—	8.40	—	53.00	155.60	65.60	73.20
美味牛肝菌 ^[24]	菌盖	—	7.02	0.96	1.98	—	—	0.15	—
	菌柄	—	0.92	0.26	5.28	—	—	0.65	—
冬菇 ^[27]	菌盖	—	0.04	0.29	1.32	7.73	0.05	0.29	14.52
	菌柄	—	0.05	0.51	1.31	7.87	0.05	0.33	15.96
	菌托	—	0.06	0.50	1.06	4.59	0.07	0.18	14.70
双孢菇 ^[30]	菌盖	—	—	0.84	—	42.62	—	3.99	94.88
	菌柄	—	—	2.51	—	46.56	—	0.76	97.38
	菌褶	—	—	1.68	—	74.10	—	1.09	164.56
香菇 ^[25]	菌盖	—	—	1.44	—	—	—	—	—
	菌柄	—	—	0.53	—	—	—	—	—
	菌褶	—	—	3.12	—	—	—	—	—
糙皮侧耳 ^[32]	菌盖	—	—	—	—	3.49	—	—	90.30
	菌柄	—	—	—	—	1.77	—	—	43.99

2 食用菌对重金属元素的吸附机制

食用菌重金属元素的吸附机制是一个系统的或者说是一个综合的过程,是多个方面协同作用的结果^[35]。尽管许多学者通过各种物理及化学方法对真菌生物对重金属元素的吸附机制进行了大量研究,并且取得了一定的研究成果,但由于食用菌自身结构及种类的复杂性和多样性,又导致不同种类的食用菌对重金属的吸附机制不同,甚至同一种食用菌在不同环境影响下的吸附机制也不同。一般认为食用菌对重金属的吸附作用主要是通过主动吸附或被动吸附而实现的^[36]。刘瑞霞等研究发现,真菌对金属离子的吸附过程一般有 2 个阶段,第 1 阶段是食用菌对重金属的吸附作用在细胞的表面完成,就是细胞壁上官能基团和细胞外多聚物对金属离子结合时的被动吸附过程;第 2 阶段是食用菌活体细胞对金属离子的主动吸附,就是食用菌细胞表面吸附的金属离子和细胞表面的某些酶进行结合,从而被运送到细胞的体内,这个吸附过程包括传输和沉积^[37]。

2.1 食用菌对重金属的被动吸附

食用菌对重金属的被动吸附依据吸附作用发生的细胞吸附剂的位置不同,可将其分为细胞外吸附、细胞表面吸附、细胞内吸附 3 种,其中细胞外吸附、细胞表面吸附为被动吸附,细胞内吸附则是主动吸附。(1)细胞外吸附。真菌胞外吸附主要通过真菌胞外聚合物(EPS),EPS 的成分主要包括多糖、蛋白质、脂肪及黑色素等,这些物质在食用菌对重金属元素的吸附作用上都起着非常重要的作用^[38]。(2)细胞表面吸附。由于细胞壁与外界环境直接接触,是外来物质进入细胞的第 1 道保护屏障,因此细胞壁的结构和成分在很大程度上决定了其对重金属的吸收。细胞壁上的活性基团巯基、羧基和羟基等与重金属元素发生化合反应形成不溶性的物质或沉淀,或者通过离子交换、氧化还原、静电吸附等方式形成无机沉淀,将重金属污染物沉积在食用菌自身的细胞壁上。Marleen 等研究表明,铬元素和六价铬可以和硫酸盐化合物的载体结合,在根部先转化为三价铬离子,而后才被食用菌菌根被动吸收,然后积累在细胞壁离子交换点上^[39]。李三署等研究发现,姬松茸细胞中积累的 Cd 大部分都被截留在细胞壁上只有少量进入到细胞内部^[40]。

2.2 食用菌对重金属的主动吸附

细胞内吸附是需要消耗能量的主动吸附,因此在真菌活体细胞内的酶促作用下,由生物大分子活性基团和重金属元素相结合,合成独特的机体内含物从而形成生物沉淀和生物积累;或者是通过金属硫蛋白(MT)与进入食用菌细胞内的重金属离子结合,使其以不具有生物活性的无毒的螯合物的形式存在于细胞内^[41-43]。Ozcan 等研究认为,食用菌可以通过主动运输的方式来吸附重金属元素,而这一运输方式与绿色植物相比食用菌更能吸附高浓度的重金属元素^[44]。Didier 等对蘑菇属真菌重金属元素的生物富集特性进行了研究,认为蘑菇属真菌对重金属元素的吸附作用主要是通过与特定的金属蛋白质载体结合后被转移到细胞体内^[45]。

3 食用菌对重金属元素的耐受机制

食用菌在吸附重金属的同时也表现出耐受性。食用菌吸

收重金属元素后,重金属元素会以各种形态存在于食用菌体内,所以当重金属的浓度达到一定程度时就会对食用菌造成胁迫作用,而食用菌就会通过自身的各种生理过程来减轻重金属对食用菌的毒害作用。食用菌的耐受机制主要是通过离子交换、络合、沉淀等作用使重金属元素在食用菌内以无毒状态存在。食用菌胞外多聚物(蛋白质、脂肪、胞外多糖等)对重金属有着吸附、络合、微沉淀、胞外还原等作用,这些是食用菌对重金属元素具有耐受机制的重要原因^[46]。冯欢等研究发现,2 种外生菌根真菌对铅元素都具有一定的耐受性,可能的抗性机制有以下 4 种:(1)阻止或减少铅元素进入菌丝体内;(2)铅元素通过可溶性蛋白螯合进入菌丝体细胞内,从而对重金属元素产生耐受机制;(3)提高抗氧化酶活性用于清除铅胁迫产生的活性氧;(4)通过分泌小分子的有机酸来螯合重金属铅,提高真菌的铅耐受性^[47]。Turnau 等通过电镜(能量分散 X 射线扫描电镜)观察真菌菌丝,发现在真菌的菌丝中形成了含重金属的晶体,证明食用菌对重金属有一定的耐受机制^[48]。陈素华等研究认为,通过菌丝体对重金属的吸附作用可以改变重金属元素的活性,这样可以把一些重金属元素还原成可溶性的或挥发性的状态^[49]。另外,食用菌胞外多聚物上有一种重要的酚类分子——黑色素,这些黑色素在食用菌对重金属元素的络合上起着至关重要的作用,由于黑色素中含有大量的羟基、羧基、酚基及氨基等物质,而这些物质为食用菌提供了大量吸附和络合重金属的位点^[49]。

此外,食用菌对重金属的耐受性也是和重金属元素在生态环境中长期相互作用的结果。如土壤性质(pH 值及有机质含量等)、水、空气、栽培基质等环境因素不仅直接或间接影响食用菌对不同种重金属元素的耐受性和吸附能力,还决定了重金属元素在食用菌中的存在形式、分布位置、吸附含量和重金属元素的种类等^[50]。张小燕等研究指出,土壤中不同质量浓度重金属元素可使食用菌外生菌根的生长具有抑制作用,特别是在高浓度时,可造成菌根真菌死亡^[51]。Demirbas 等研究发现,食用菌中的汞离子和镉离子积累量和土壤中汞离子和镉离子的含量存在相关性^[52]。姜利兵等也研究证明,子实体对土壤中重金属元素有一定耐受机制^[53-54]。

4 食用菌吸附重金属元素的应用

4.1 利用食用菌对重金属元素的吸附性净化环境

利用食用菌对重金属具有超富集的能力作为生物修复的材料,净化环境中有害重金属的污染。食用菌应用于重金属污染环境修复时,其拥有很多独特优势:(1)相比于细菌,食用菌对重金属元素的吸附范围广,生长速度快,易于采摘,对环境要求低并且抗逆性强。(2)食用菌还拥有纤维素降解、生物防治、产生植物激素等多种功能,这些均有利于食用菌对重金属的修复。曲明清等研究表明,杏鲍菇子实体中重金属的含量随栽培基质中重金属浓度的增加而增加^[55]。Baldrian 等研究发现,利用白腐真菌对废水中的铜、汞、镉等几种重金属元素进行吸附量检测,发现白腐真菌的菌丝体对不同重金属离子都有选择性吸收的能力^[56]。Chen 等通过研究发现,黄孢原毛平革菌是一种可以吸附并能降解重金属元素的真菌,其可以作为生物修复剂^[57]。

4.2 利用食用菌对重金属元素的敏感性进行环境监测

食用菌由于对重金属元素有很强的敏感性,所以可用作重金属元素污染的监测指示物。Van 等研究发现,灵芝可以作为检测空气中铯(Cs)污染的生物指示剂^[58]。Garcia 等研究发现,毛头鬼伞(*Coprinus comatus*)对环境中的铅元素敏感,认为毛头鬼伞也可作为环境中铅元素污染的指示物^[29]。Svoboda 等研究认为,食用菌的菌丝年龄和菌丝所处的生长周期是影响子实体对重金属元素吸附量水平的重要因素之一,所以可以利用大型真菌的子实体的敏感性来区分污染的场地和未被污染的场地^[59]。Ouzouni 等对 8 种在希腊同一地区不同地点采集的可食用真菌体内的重金属元素含量进行了检测,发现 Pb、Cd、As 这 3 种重金属在真菌体内含量低,证明了该地区没有受到这 3 种重金属的污染^[60]。

4.3 食用菌的保健价值及药用价值

真菌在吸附重金属元素的同时,也对多种人体所需的金属元素和矿物质有一定的富集作用,通过这一吸附特点人们可以利用食用菌来生产保健食品,如富锌蘑菇、富锗灵芝等^[61]。康德灿等对杏鲍菇菌丝体进行富硒液体培养,并利用杏鲍菇菌丝提取液、薏苡汁液、柠檬酸及白砂糖等成分制备复合饮料,而这种复合饮料不仅具有人体所需的生物硒这种保健元素,可以增强体质,还具有杏鲍菇菌体蛋白、多糖体、维生素、薏苡浸汁等丰富的营养成分^[62]。龙思颖等对蛹虫草菌丝体进行液体发酵配方优化,使蛹虫草菌丝体硒吸收率达 39.22%,提高了富硒蛹虫草的营养价值,为食用菌企业研发功能型保健品提供了 1 种新的试验模型^[63]。康德灿等研究利用平菇和金针菇通过液体发酵,来生产富钙菌丝体,并将这种菌丝体酶解提取液添加到豆奶中,制作成含有高钙的豆奶产品^[64]。赵佳英等通过对香菇子实体的富锗培养试验发现,香菇子实体能有效富集锗,提高了香菇的鲜度和营养价值^[65]。陈彩霞等采用四氯化碳(CCl_4)制备大鼠肝损伤模型,探讨富锗灵芝胶囊对四氯化碳所致大鼠肝损伤的保护作用,结果表明富锗灵芝胶囊在一定范围对 CCl_4 所致肝损伤具有一定的保护作用^[66]。

5 展望

食用菌种类多样,环境适应性强,除了具有丰富的营养价值和重要的医疗保健功能外,食用菌对重金属的吸附特性也远远超过绿色植物。人类可以充分利用其富集重金属的特点,进行生态环境保护及监测。此外,食用菌对有益于人类健康的多种金属元素和矿物质元素也有较强的富集作用,人们可以通过有效利用食用菌富集矿物质的特性,提高食用菌的营养价值,生产出更多更好的保健产品,来提高产品的附加值。

参考文献:

- [1] 李亚娇,孙国琴,郭九峰,等. 食用菌营养及药用价值研究进展[J]. 食药菌,2017,25(2):103-109.
- [2] Sang C J, Yong T J, Byung K Y, et al. White button mushroom (*Agaricus bisporus*) lowers blood glucose and cholesterol levels in diabetic and hypercholesterolemic rats[J]. Molecular Nutrition & Food Research,2010,30(1):49-56.
- [3] Barros L, Venturini B A, Baptista P, et al. Chemical composition and biological properties of Portuguese wild mushrooms: a comprehensive

- study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(10):3856-3862.
- [4] 杨文建,赵立艳,安辛欣,等. 食用菌营养与保健功能研究进展[J]. 食药菌,2011,19(1):15-18.
- [5] Gast C H, Jansen E, Bierling J, et al. Heavy metals in mushrooms and their relationship with soil characteristics[J]. Chemosphere,1988,17(4):789-799.
- [6] Chittaragi A, Naika R. Determination of trace elements on some wild mushroom samples encountered from Western Ghats of Karnataka[J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research,2014,6(7):2124-2135.
- [7] Sesli E, Tuzen M. Levels of trace elements in the fruiting bodies of macro fungi growing in the East Black Sea region of Turkey[J]. Food Chemistry,1999,65(4):453-460.
- [8] 林 估,孙 灿,段志敏,等. 云南省常见野生食用菌 13 种矿物质元素调查分析[J]. 中国卫生检验杂志,2011,21(6):1521-1523.
- [9] 陈 琛. 食用菌中重金属和砷的形态分析及加工处理对香菇中重金属和砷的影响[D]. 南京:南京农业大学,2015.
- [10] Mazurkiewicz N, Podlasinska J. Bioaccumulation of trace elements in wild - growing edible mushrooms from Lubuskie voivodeship, Poland[J]. Chemistry and Ecology,2014,30(2):110-117.
- [11] Mleczek M, Siwulski M, Mikolajczak P A, et al. Content of selected elements in *Boletus badius* fruiting bodies growing in extremely polluted wastes[J]. Environmental Letters,2015,50(7):9.
- [12] 杨天伟,张 霁,Jerzy F,等. 云南常见牛肝菌属真菌中汞含量及食用安全评价[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3518-3525.
- [13] Garcia M, Alonso J, Fernandez M, et al. Lead content in edible wild mushrooms in northwest Spain as indicator of environmental contamination[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology,1998,34(4):330-335.
- [14] 施巧琴,林 琳,陈哲超,等. 重金属在食用菌中的富集及其生长代谢的影响[J]. 真菌学报,1991,10(4):301-311.
- [15] 孙希雯,李奇庚. 金针菇富锌条件及锌结合形态的研究[J]. 微生物学报,1997,37(1):40-46.
- [16] 雷敬敏,杨德芬. 食用菌重金属含量与土壤——培养料重金属含量的相关性研究[J]. 四川环境,1990,9(4):19-28.
- [17] 杨志孝,苏延友,安 蔚. 灵芝菌株富铬性能的研究[J]. 泰山医学院学报,2005,26(2):120-122.
- [18] 张瑞华,张 博,吴 杨. 食用菌富集重金属特征及风险评价[J]. 世界有色金属,2016(17):115-116.
- [19] 王小平. 电感耦合等离子体质谱技术在元素分析中的应用[D]. 苏州:苏州大学,2009.
- [20] Tel G, Cavdar H, Deveci E, et al. Minerals and metals in mushroom species in Anatolia[J]. Food Additives & Contaminants Part B - Surveillance,2014,7(3):226-231.
- [21] Uzun Y, Gencecep H, Kaya A, et al. The mineral contents of some wild edible mushrooms[J]. Ekoloji,2011,20(80):6-12.
- [22] Wang X M, Zhang J, Li T, et al. ICP - AES determination of mineral content in *Boletus tomentipes* collected from different sites of China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(5):1398-1403.
- [23] Zhang D, Zhang Y, Ewa M, et al. Trace elements in *Leccinum scabrum* mushrooms and topsoils from Klodzka dale in sudety mountains, Poland[J]. Journal of Mountain Science,2013,10(4):621-627.
- [24] 邢 博,张 霁,李杰庆,等. ICP - MS 法测定云南省 8 种野生

- 牛肝菌中矿物质元素含量[J]. 食品科学,2016,37(12):89-94.
- [25]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.
- [26]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研究[J]. 中国农学通报,2007,23(3):406-409.
- [27]杨珍. 黔产冬荪重金属及农残含量与食用潜在健康风险评价——以白云区蓬莱仙界基地为例[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
- [28]Márgeles G, Julián A, Melgar M J. Lead in edible mushrooms: levels and bioaccumulation factors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,167(1/2/3):777-783.
- [29]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]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1998,34(4):330-335.
- [30]Malinowska E, Szefer P, Falandysz J. Metals bioaccumulation by bay bolete, *Xerocomus badius*, from selected sites in Poland[J]. Food Chemistry, 2004,84(3):405-416.
- [31]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.
- [32]卢娇娇. 铜(Cu^{2+})对糙皮侧耳生长发育的影响研究[D]. 郑州:河南农业大学,2015.
- [33]Vaaramaa K, Solatie D, Aro L. Distribution of 210Pb and 210Po concentrations in wild berries and mushrooms in boreal forest ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2009,408(1):84-91.
- [34]Rudawska M, Leski T. Macro- and microelement contents in fruiting bodies of wild mushrooms from the Notecka forest in west-central Poland[J]. Food Chemistry, 2005,92(3):499-506.
- [35]Petkovsek S A, Pokorny B. Lead and cadmium in mushrooms from the vicinity of two large emission sources in Slovenia[J]. Science of the Total Environment, 2013,443:944-954.
- [36]朱萌,李维焕,程显好,等. 真菌对重金属生物吸附机理的研究进展[J]. 工业用水与废水,2012,43(6):7-10.
- [37]刘瑞霞,汤鸿霄,劳伟雄. 重金属的生物吸附机理及吸附平衡模式研究[J]. 化学进展,2002,14(2):87-92.
- [38]王亮,陈桂秋,曾光明,等. 真菌胞外聚合物及其与重金属作用机制研究进展[J]. 环境污染与防治,2010,32(6):74-80.
- [39]Marleen V P, Noël D, Geert P J J, et al. Selected trace and ultratrace elements: biological role, content in feed and requirements in animal nutrition - elements for risk assessment[J]. EFSA Supporting Publications, 2010,7(7):68.
- [40]李三暑,雷锦桂,颜明娟,等. 镉对姬松茸细胞悬浮培养的影响及其在细胞中的分布[J]. 江西农业大学学报,2001,23(3):329-331.
- [41]Vijver M G, Van Gestel C A, Lanno R P, et al. Internal metal sequestration and its ecotoxicological relevance: a review[J]. Environmental Science and Technology, 2004,38(18):4705-4712.
- [42]王达,葛刚,吴兰,等. 金属硫蛋白(MT)的分离纯化与检测技术[J]. 江西科学,2004,22(1):61-65.
- [43]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.
- [44]Ozcan M M, Dursun N, Al J F. Heavy metals intake by cultured mushrooms growing in model system[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013,185(10):8393-8397.
- [45]Didier M, Eliane S, Jean C D, et al. Update on metal content profiles in mushrooms - toxicological implications and tentative approach to the mechanisms of bioaccumulation[J]. Toxicon, 1998,36(12):1997-2012.
- [46]Zhang W W, Hu Y J, Cao Y R, et al. Tolerance of lead by the fruiting body of *Oudemansiella radicata*[J]. Chemosphere, 2012,88(4):467-475.
- [47]冯欢,豆青,王海华,等. 2种外生菌根真菌的铅耐受性及相关机制[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):188-196.
- [48]Turnau K, Kottke I, Dexheimer J. Toxic element filtering in *Rhizopogon roseolus*/*Pinus sylvestris* mycorrhizas collected from calamine dumps[J]. Mycological Research, 1996,100(1):16-22.
- [49]陈素华,孙铁珩,周启星,等. 微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. 应用生态学报,2002,13(2):239-242.
- [50]罗立新,孙铁珩,靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累[J]. 环境科学学报,1998,18(5):49-53.
- [51]张小燕,黄建国,许金山,等. 外生菌根真菌与重金属相互作用研究现状[J]. 江苏林业科技,2004,31(2):41-43.
- [52]Demirbas A. Metal ion uptake by mushrooms from natural and artificially enriched soils[J]. Food Chemistry, 2002,78(1):89-93.
- [53]姜利兵,张建强. 土壤重金属污染的形态分析及生物有效性探讨[J]. 工业安全与环保,2007,33(2):4-6.
- [54>Dryzaowska A, Falandysz J. Bioconcentration of mercury by mushroom *Xerocomus chrysenteron* from the spatially distinct locations: levels, possible intake and safety[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014,107:97-102.
- [55]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.
- [56]Baldrian P. Interactions of heavy metals with white-rot fungi[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003,32(1):78-91.
- [57]Chen G Q, Fan J Q, Liu R S, et al. Removal of Cd(II), Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions by live *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Environmental Science and Technology, 2012,33(23):2653-2659.
- [58]Van L T, Duy T L. Linhchi mushrooms as biological monitors for 137Cs pollution[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1991,155(6):451-458.
- [59]Svoboda L, Zimmermannová K, Kalac P. Concentrations of mercury, cadmium, lead and copper in fruiting bodies of edible mushrooms in an emission area of a copper smelter and a mercury smelter[J]. Science of the Total Environment, 2000,246(1):61-67.
- [60>Ouzouni P K, Veltsistas P G, Paleologos E K. Determination of metal content in wild edible mushroom species from regions of Greece[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007,20(6):480-486.
- [61]臧珍娣,闵三弟. 香菇子实体富锗效应[J]. 上海农业学报, 1991,7(2):32-37.
- [62]康德灿,彭凌,安敏. 杏鲍菇富硒蒟蒻汁复合饮料的研制[J]. 食品科技,2003(10):79-81.
- [63]龙思颖,康德灿,柯江,等. 液体发酵培养富硒蛹虫草菌丝体优化条件的试验[J]. 食用菌,2016(3):11-13.
- [64]康德灿,彭凌,安敏. 金针菇富硒蒟蒻汁复合饮料的研制[J]. 食品科学,2003,24(8):91-92.
- [65]赵佳英,康德灿,高永峰,等. 微生物富集有益元素食品的研发概况与展望[J]. 食品研究与开发,2017,38(12):206-210.
- [66]陈彩霞,康德灿,刘墨,等. 魔芋载体培养北虫草菌丝体研制功能性豆奶[J]. 西部皮革,2016,38(6):35-37.