

刘哲, 王康, 穆虹宇, 等. 香菇中重金属含量风险分析及栽培基质对重金属累积的作用[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1226–1232.

LIU Zhe, WANG Kang, MU Hong-yu, et al. Risk assessment of heavy metals in *Lentinula edodes* and the role of substrate in accumulation of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1226–1232.

香菇中重金属含量风险分析及栽培基质对重金属累积的作用

刘哲, 王康, 穆虹宇, 庄坚, 李花粉*

(农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为探究北京市市场流通中食用香菇重金属含量情况以及对人体的健康影响,采集北京市流通领域中107份香菇样品,测定了镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)的含量水平,依据靶标危害系数方法(THQ)评价了香菇通过膳食途径摄入4种重金属的人体健康风险;同时通过栽培基地采样,研究了栽培基质与香菇中重金属含量的相关性。结果显示:采集的香菇样品中重金属Cd、As、Hg、Pb的含量范围分别为ND~0.76、0.01~0.30、ND~0.03、ND~1.79 mg·kg⁻¹,Cd和Pb的超标率均为5.6%,而Hg和As未出现超标情况;鲜食与干食香菇的重金属含量没有显著性差异;香菇子实体中Cd、As、Pb含量与基质重金属含量呈现极显著相关,香菇中Cd的富集系数最高,分别是As、Hg、Pb的3.70、5.67、1.63倍;香菇4种重金属的THQ均未超过安全阈值,儿童经香菇途径摄入As的THQ值相对较高,需引起注意。北京市流通领域香菇的主要污染因子是Cd和Pb,栽培基质中的Cd更易被香菇子实体吸收并累积。

关键词:重金属;香菇;基质;靶标危害系数方法(THQ)

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)06-1226-07 doi:10.11654/jaes.2018-1200

Risk assessment of heavy metals in *Lentinula edodes* and the role of substrate in accumulation of heavy metals

LIU Zhe, WANG Kang, MU Hong-yu, ZHUANG Jian, LI Hua-fen*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to investigate the heavy metals content in *Lentinula edodes* in the Beijing market and its dietary effect on human health, 107 fungi samples were collected. The levels of Cd, As, Hg, and Pb were measured, and the dietary risks of the four heavy metals to human health were evaluated through the target hazard quotient (THQ) method. Additionally, the correlation between the heavy metals contents in the cultivation substrate and those in *L. edodes* was studied. The results showed that the contents of Cd, As, Hg, and Pb in the collected samples were ND~0.76, 0.01~0.30, ND~0.03 mg·kg⁻¹, and ND~1.79 mg·kg⁻¹, respectively. The over-standard rates of Cd and Pb were both 5.6%, while no Hg or As contents exceeded the standard. No significant differences were observed between the heavy metals contents in fresh and dried mushrooms. The contents of Cd, As, and Pb in the fruiting bodies of *L. edodes* were significantly correlated with those in the substrate. The enrichment coefficient of Cd is the largest, which is 3.70, 5.67 and 1.63 times of As, Hg, and Pb, respectively. The THQs of the four heavy metals were all within the safe threshold, but it was noteworthy that the THQ of As for children was relatively high. Therefore, the major pollution factors of *L. edodes* in circulation in Beijing were Cd and Pb, and Cd in the cultivation substrate was more easily absorbed and accumulated by the fruiting body of *L. edodes*.

Keywords: heavy metal; *Lentinula edodes*; substrate; target hazard quotient (THQ)

收稿日期:2018-09-20 录用日期:2018-11-29

作者简介:刘哲(1994—),女,河北石家庄人,硕士研究生,从事环境污染化学研究。E-mail:zheliu@edu.cau.cn

*通信作者:李花粉 E-mail:lihuafen@cau.edu.cn

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2018TC001);国家农产品质量安全风险评估重大专项(GJFP2017006)

Project supported: Special-funds for Basic Scientific Research Business Expenses of the Central Colleges and Universities (2018TC001); Major Project for Risk Assessment of National Agricultural Product Quality and Safety (GJFP2017006)

随着人民生活水平的提高,绿色、健康、安全的饮食成为人们关注的热点。食用菌富含人体必需的微量元素、氨基酸、多糖等营养物质和生理活性物质,是全球公认的高品质蛋白质和营养成分来源^[1]。然而,食用菌在含有众多营养成分的同时,也具有强烈的富集重金属的能力^[2-3],导致其重金属含量高于粮食和蔬菜等植食性产品。

有研究表明,与绿色植物相比,食用菌具有更高积累Cd、Pb和Hg等重金属的能力^[4-5]。并且,不同种类食用菌也显示出对重金属不同的富集能力,张玉洁等^[6]对云南省市售的多种鲜食用菌样品的调查显示,食用菌对Cd的富集能力为平菇>香菇>灵芝>杏鲍菇>茶树菇>金针菇,而对As的累积表现为平菇>灵芝>杏鲍菇>茶树菇=香菇,对Pb的累积能力为茶树菇>杏鲍菇>平菇>香菇=灵芝;王北洪等^[7]的研究表明,某省收集的食用菌中香菇中Cd含量约为金针菇、黑木耳、平菇的2~27倍。从以往的调查研究中发现,不同种类的食用菌对不同重金属的累积能力不尽相同。其中,香菇表现出较强的Cd富集能力。

针对香菇对重金属具有较高富集能力的现象,本研究选取北京市流通领域的各大农贸批发市场、大型综合超市以及社区菜市场的香菇样品,重点研究不区分品种的香菇中重金属含量水平;同时采集了栽培基质的香菇样品以及相应的栽培基质,探究栽培基质与香菇重金属含量的相关性;评价香菇重金属的人体健康风险,为相关的决策和标准的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

通过文献查阅和调研分析,确定北京市香菇样品采集重点为各个城区大型农副产品批发市场以及主要的综合超市,同时涉及小型超市和集贸市场以及食用菌生产基地。在样本采集的过程中,随机采集样本,采样点覆盖北京区县,并结合区县的实际情况,分配各区县的采样点数。采集的香菇样品主要来自丰台区新发地批发市场和京丰岳各庄批发市场、海淀区西北旺综合市场和锦绣大地批发市场、朝阳区大洋路农副产品批发市场、东城区东单菜市场、西城区阜外蔬菜农副产品交易市场、崇文门菜市场、石景山区京西农贸产品批发市场、宣武区的椿树园市场和安顺成市场、通州区八里桥批发市场,以及密云、通州、大兴、房山等食用菌栽培基地。为了全面地了解北京市流通领域香菇重金属含量状况,在本研究中,除了采集

新鲜的香菇外,还采集了北京市市场上销售的干食香菇,共采集干制品和新鲜的香菇样品107份,其中干食样品40份,鲜食样品67份。

同时,为了解香菇重金属含量与基质中重金属的含量关系,于房山区和通州区的8个食用菌栽培基地采集有代表性的香菇及其对应的栽培基质样品,每个采样点采集2个平行样品。为了保证样品之间的可比性,采集的香菇样品均为头茬菇。采样地点分布在通州区的台湖镇董村、马驹桥镇东田阳村、宋庄镇北寺村以及房山区的食用菌示范基地、大石窝镇南河村、琉璃河镇石村、阎村镇北坊村。基质组成主要包括木屑、麸皮、石膏、玉米粉、棉籽壳、白糖等几种常见的菌类基质成分。

1.2 样品的制备

香菇样品采集后立即运回实验室进行前处理,剔除干香菇和鲜香菇样品上残留的基质和其他杂质,样品用自来水冲洗后,再用去离子水冲洗3遍,吸干香菇表面的水分,称量鲜香菇的质量。自然条件下风干1~2 d后,在70℃烘箱中烘干至恒质量,称量鲜香菇的干质量。烘干后的鲜食香菇样品和干香菇样品用不锈钢粉碎机绞碎待用。

香菇基质采集后在实验室晾晒1~2 d,于70℃烘箱中烘干至恒质量,烘干后经不锈钢粉碎机绞碎待用。

1.3 样品的分析和测试

使用天平称取0.500 0 g粉碎的香菇样品加入到微波消解管中,随后加入8 mL硝酸(优级纯),冷消化过夜。第2 d用微波消解仪进行微波消解,微波消解完全结束后,将消解液用高纯水定容至50 mL容量瓶中,定量滤纸过滤。采用试剂空白和标准样品进行质量控制。消解液中的Cd、Pb用原子吸收分光光度计测定(北京普析通用仪器有限责任公司TAS-990型石墨炉GF-990);Hg、As用原子荧光光度计测定(北京吉天仪器有限公司AFS-920双道原子荧光光度计)。测定所需的标准溶液和标准样品购自中日友好环境中心,在整个样品的测定过程中使用国家标准样品GSBZ 51001-94 ESP-1西红柿叶子和空白样品进行分析质量控制。香菇基质的测定方法同上。

1.4 统计分析与污染评价标准

采用SPSS软件进行方差分析和相关性分析。香菇中重金属含量评价采用《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中相应的限量标准,其中食用菌中Cd、As、Hg、Pb的标准值分别为0.5、0.5、0.1、1.0 mg·kg⁻¹,依据标准规定污染物限量以相应新

鲜食品中污染物限量结合其脱水率折算,干食香菇通过香菇的含水率折算为鲜质量计算样品中重金属含量,标准与近几年的调查文献一致。

1.5 人体健康风险评价方法

采用美国国家环保署提出的靶标危害系数方法(Target hazard quotients, THQ)评价人体通过香菇摄取重金属对身体健康造成的风险。在假定重金属吸收剂量等于摄取剂量的前提下,计算人体摄入香菇重金属剂量与参考剂量的比值,如果所得THQ值<1,表示香菇对暴露人群不存在明显的健康风险,THQ值越大,表明重金属对人体的健康风险越大。并且,THQ法可区别评价儿童和成人的风险程度,由于不同年龄人群的参数不同,更能体现出不同年龄人群的健康风险程度。THQ计算公式如下:

THQ = (E_F × E_D × F_{IR} × C) / (R_{FD} × W_{AB} × T_A) × 10⁻³ (1)

公式(1)中的各项参数取值见表1。

2 结果与讨论

2.1 香菇中重金属含量

北京市场上销售的香菇样品中重金属元素含量统计分析结果见表2。采集的香菇样品中重金属Cd、As、Hg、Pb的含量范围分别为ND~0.76、0.01~0.30、ND~0.03、ND~1.79 mg·kg⁻¹,依据GB 2762—2017中相应的限量标准,检测到香菇样品中Cd、Pb出现超标样品,超标率均为5.6%,而Hg和As未出现超标情况。4种重金属元素的总体变异系数大小依次为Pb>Cd>Hg>As,其中Cd、Pb的变异系数均大于100%,说明其

含量受食用菌品种和栽培环境的影响波动较大;而As、Hg含量较低,浓度变化范围相对前两种重金属较窄,变异系数均小于100%。王光强等^[13]对上海市食用菌的调查显示,香菇中Cd、As、Hg、Pb 4种重金属均不超标;而陆剑飞等^[14]对浙江省食用菌的调查显示,香菇中Cd、As、Hg、Pb超标率分别为3.0%、0、1.6%、0;陈黎等^[15]对四川地区食用菌的调查显示,香菇中Cd、As、Hg、Pb超标率分别为47.06%、0、11.76%、0。王北洪等^[7]在某省的调查显示,69份香菇样品中Cd、As、Hg、Pb超标率分别为10.14%、5.80%、1.45%、0。总体来说,在不同的调查结果中香菇中Cd的超标率相对较高。

本研究表明香菇中重金属元素的含量均值为Pb>Cd>As>Hg(表2),李爽等^[16]对北京市主要食用菌的重金属含量进行了调查,得到的结果是Pb>As>Cd。而张玉洁等^[6]对昆明市售鲜食用菌的调查则显示为Cd>Pb>As。这说明,不同地区食用菌重金属含量情况不一致。

香菇有鲜食和干食两种,为了比较两种香菇重金属含量的差异,对鲜食和干食香菇分别进行了统计分析,结果见表3。市场上销售的鲜食香菇中重金属Cd、As、Hg和Pb的浓度范围分别为0.01~0.76、0.01~0.30、ND~0.03、0.03~1.79 mg·kg⁻¹,平均含量分别是0.15、0.05、0.004 9、0.23 mg·kg⁻¹;干食香菇中重金属Cd、As、Hg和Pb的含量范围分别为ND~0.57、0.02~0.22、ND~0.02、ND~1.32 mg·kg⁻¹,平均含量为0.16、0.09、0.002 6、0.24 mg·kg⁻¹;鲜食与干食香菇的重金属含量情况基本一致。鲜食香菇中重金属Cd的超标率

表1 评估参数汇总表
Table 1 Evaluation parameter summary table

参数符号 Parameter symbol	参数含义 Parameter meaning	取值 Value	单位 Unit	数据取值来源 Data source
E _F	暴露频率	365	d·a ⁻¹	[8]
E _D	暴露时间	30(成人), 7(儿童)	a	[9-10]
T _A	非致癌性平均暴露时间	10 950(成人), 2555(儿童)	d	[9]
F _{IR}	食用菌摄入量	134.7(成人), 93.4(儿童)	g·d ⁻¹	[11-12]
C	食用菌重金属含量	见表2	mg·kg ⁻¹	本文检测结果
R _{FD}	参比剂量 R _{FD} (oral)	R _{FD} (Cd)=1×10 ⁻³ R _{FD} (As)=3×10 ⁻⁴ R _{FD} (Hg)=3×10 ⁻⁴ R _{FD} (Pb)=3.5×10 ⁻³	mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	[8]
W _{AB}	人体平均体质量	61.75(成人), 25.6(儿童)	kg	[11-12]

注: F_{IR}为估计值,假设食用菌摄入量占蔬菜摄入量的50%。
Note: F_{IR} is an estimate, assuming that the intake of edible fungi accounts for 50% of the vegetable intake.

表2 香菇中重金属元素含量统计分析(mg·kg⁻¹鲜质量)

Table 2 Statistics analysis on heavy metal contents in *Lentinula edodes*(mg·kg⁻¹ Fresh weight)

元素 Element	最小值 Minimum	百分位数值 Percentile value				最大值 Maximum	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	标准限值 Standard limit	超标率 Excess rate/%
		25%	50%	75%	95%						
Cd	ND	0.03	0.10	0.19	0.50	0.76	0.15	0.16	102	0.5	5.60
As	0.01	0.03	0.05	0.08	0.16	0.30	0.06	0.05	77	0.5	0
Hg	ND	0.002 8	0.004 1	0.006 6	0.019 1	0.03	0.01	0.01	95	0.1	0
Pb	ND	0.05	0.13	0.26	1.00	1.79	0.23	0.30	130	1.0	5.60

注:变异系数=标准差/平均值;ND表示未检出。下同。
Note:Coefficient of variation =STDEV/Average;ND means not detected. The same below.

表3 干食和鲜食香菇中重金属元素含量比较(mg·kg⁻¹鲜质量)

Table 3 Comparison analysis on heavy metal contents in fresh and dry food *Lentinula edodes*(mg·kg⁻¹ Fresh weight)

项目 Items		Cd	As	Hg	Pb
鲜食香菇 (67)	浓度范围	0.01~0.76	0.01~0.30	ND~0.03	0.03~1.79
	平均值	0.15	0.05	0.0049	0.23
	变异系数/%	100	96	91	144
	超标率/%	4.48	0	0	7.46
干食香菇 (40)	浓度范围	ND~0.57	0.02~0.22	ND~0.02	ND~1.32
	平均值	0.16	0.09	0.0026	0.24
	变异系数/%	105	47	91	107
	超标率/%	7.5	0	0	2.5

要低于干食香菇,但是Pb的超标率却是干食香菇的3倍。邵祥龙等^[17]对上海市6区食用菌中重金属的调查显示,市场上采集的129份新鲜香菇中Pb的平均含量为0.11 mg·kg⁻¹,97份干制香菇中Pb的平均含量为0.217 mg·kg⁻¹,干制香菇中Pb的平均含量要比新鲜香菇的含量高。但本次调查的结果中干食香菇和鲜食香菇中Pb的含量没有显著差异,这可能与样品的来源不同有关。

2.2 重金属在香菇中的累计分布

香菇中4种重金属的频率分布图(图1)显示4种重金属含量表现出不均匀的分布状况,均呈偏态分布。Cd含量在0~0.30 mg·kg⁻¹范围内的香菇样品数占总数的83%;As含量主要集中在0.02~0.10 mg·kg⁻¹之间,占总数的86%;Hg含量较低,最大值仅为0.03 mg·kg⁻¹,在0~0.01 mg·kg⁻¹间的香菇样品数占总数的92%;Pb含量同样主要分布在含量较低区域,0~0.30 mg·kg⁻¹之间的样品占总数的81%。由此可见,4种重金属主要分布在含量较低的范围内,重金属含量较高的样品所占比例均较小。徐映如等^[18]对上海市售食用菌的调查显示,37份香菇中Hg的含量范围在ND~0.05 mg·kg⁻¹;As的含量范围在0.01~1.10 mg·

kg⁻¹。总体来说,香菇中Hg的含量较低,由于样品来源复杂,不同的调查中As的含量有一定的差异。

2.3 栽培基质对食用菌重金属含量的影响

香菇中的重金属主要来源于栽培基质、水和空气等,为了解栽培基质对重金属累积的影响,在食用菌栽培基地对点的采集了香菇子实体及其栽培基质。分析结果显示,栽培基质中Cd、As、Hg、Pb含量分别为ND~0.17、0.01~1.32、ND~0.15、0.01~3.05 mg·kg⁻¹,香菇子实体中Cd、As、Hg、Pb含量分别为ND~0.16、ND~0.31、0~0.04、0.01~0.86 mg·kg⁻¹。食用菌栽培基地采集的香菇样品中重金属含量均没有超过标准限值。对栽培基质和香菇子实体中重金属含量进行相关性分析(表4),结果表明,子实体中Cd、As、Pb含量与基质中重金属含量均呈现极显著相关。香菇对Cd的富集系数最高,分别是As、Hg、Pb的3.70、5.67、1.63倍,栽培基质中的Cd更易被香菇子实体吸收并累积。在外源添加重金属的情况下,徐丽红等^[19]对香菇5种重金属的富集能力进行了研究,发现香菇对5种重金属的富集能力依次为Cd>Hg>As>Cu>Pb;雷敬敷等^[3]研究了香菇和双孢蘑菇等对重金属的富集能力,得到的结果是Cd>Cu>Zn>Pb;黄建成等^[20]对姬松茸生产栽

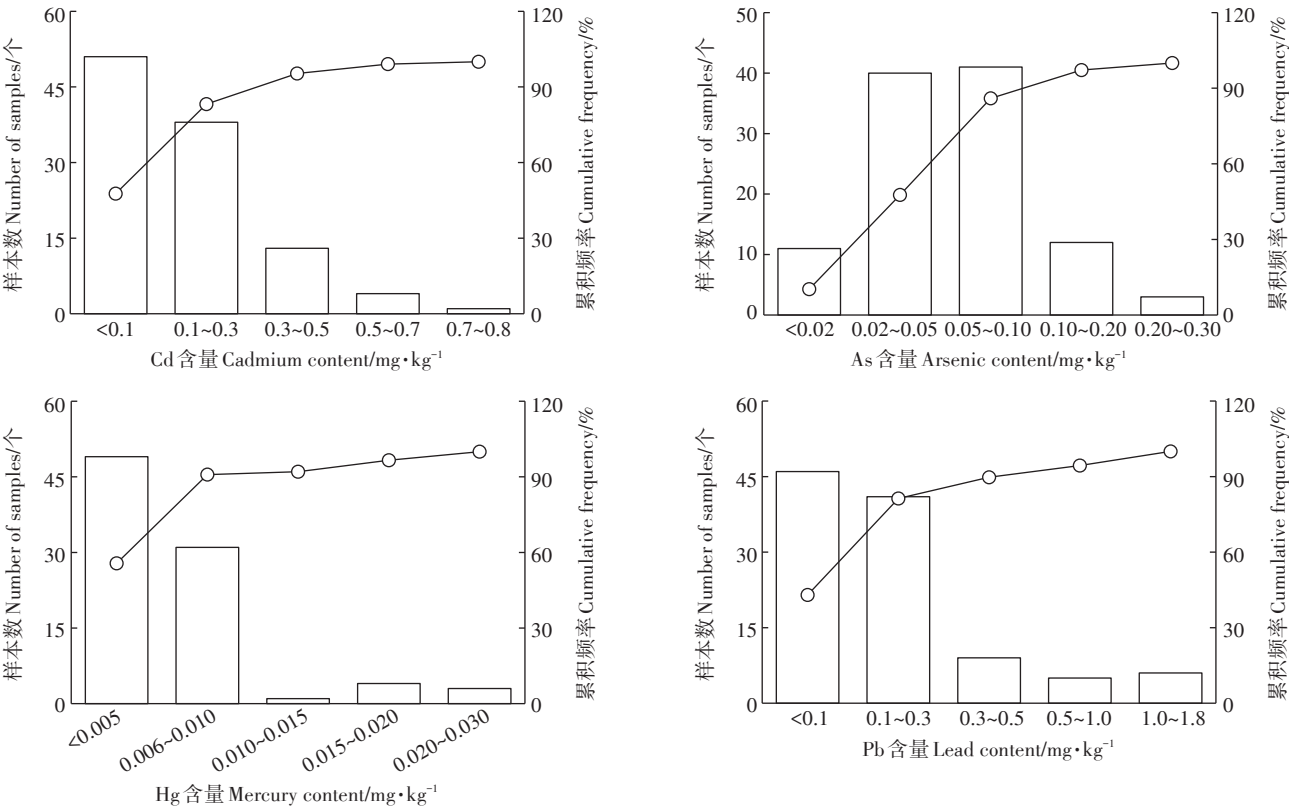


图1 香菇中重金属含量累积频率分布图

Figure 1 Cumulative frequency distribution of metal contents in the *Lentinula edodes*

培过程的试验结果显示,子实体对Pb和As的富集作用不显著,但对Hg和Cd的富集系数达到2.4~4.0和27.8~32.4,是Pb和As的近百倍。众多研究结果都显示出香菇对Cd有高富集能力,栽培基质中Cd的含量对香菇子实体中Cd含量影响很大。

根据GB 2762—2017中要求的香菇重金属含量

表4 栽培基质与香菇子实体重金属含量相关分析

Table 4 Correlation analysis on heavy metal contents between cultivated substrates and *Lentinula edodes*

元素 Element	回归方程 Regression equation	R^2	富集系数 Enrichment factor	临界值 Threshold/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cd	$y=0.989\ 1x-0.003\ 6$	0.918\ 6**	0.85 ± 0.11	0.51
As	$y=0.204\ 2x-0.002\ 9$	0.982\ 8**	0.23 ± 0.06	2.46
Hg	$y=0.190\ 2x+0.002\ 1$	0.621\ 0*	0.15 ± 0.05	0.51
Pb	$y=0.222\ 9x-0.004\ 5$	0.862\ 5**	0.52 ± 0.12	4.51

注:**和*分别表示达到0.01和0.05显著水平;富集系数=香菇子实体中重金属含量/栽培基质中重金属含量;临界值表示基质浓度超过限度时,种植在此基质上的香菇会出现超标。

Note: ** and * represent significant levels at 0.01 and 0.05 respectively. Bioconcentration factor = Average heavy metal content of *Lentinula edodes* fruiting body / Average heavy metal content of substrate. Threshold: When the substrate concentration exceeds the limit, the mushrooms grown on the substrate will exceed the standard.

标准,通过回归方程估计栽培基质中Cd、Pb、Hg、As 4种有毒重金属的临界浓度分别为0.51、2.46、0.51、4.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,若基质重金属含量高于此浓度,则会使香菇子实体中重金属超标。由于香菇生长周期较短,通过子实体吸收重金属的途径有限,因此依靠菌丝从栽培基质中吸收是重金属进入子实体的主要途径^[21],栽培者需要从源头上关注培养料中的重金属含量来控制香菇子实体中重金属含量,从而实现香菇等菌类的安全生产。

2.4 人体健康风险分析

使用公式(1)计算THQ值,对成人和儿童经食用香菇摄入重金属产生的健康风险进行评价。结果见表5。

结果显示,就成人来说,7.47%的Cd、8.41%的As、1.87%的Pb出现 $\text{THQ}\geq 1$ 的情况,存在食用风险。成人摄入Cd、As、Hg和Pb元素的THQ均值均低于1,总体上香菇中4种重金属对成人的影响尚且安全。而就儿童来说,18.69%的Cd、23.36%的As、5.61%的Pb出现 $\text{THQ}\geq 1$ 的情况,这部分香菇对儿童的健康具有风险性。儿童摄入香菇中4种重金属的THQ均值 < 1 ,As的THQ值较大,存在健康隐患。儿童对摄入香

表5 北京市居民经香菇途径接触人体的重金属THQ值
Table 5 THQ value of heavy metal in contact with human body by the residents of Beijing

元素 Element	成人 Adult			儿童 Child		
	THQ≥1的份数 Percentage of samples/%	$\bar{x}\pm s$	范围 Range	THQ≥1的份数 Percentage of samples/%	$\bar{x}\pm s$	范围 Range
Cd	8(7.47)	0.34±0.34	0.01~1.67	20(18.69)	0.56±0.57	0.02~2.70
As	9(8.41)	0.46±0.35	0.01~2.15	25(23.36)	0.77±0.58	0.04~3.59
Hg	0(0)	0.04±0.04	0~0.22	0(0)	0.07±0.07	0~0.37
Pb	1(1.87)	0.14±0.19	0~1.11	6(5.61)	0.24±0.31	0~1.86

菇中4种重金属的THQ均值均高于成人,说明通过香菇摄入重金属对儿童的健康风险要大于成人,需格外关注儿童食用香菇的来源以及食用量。4种重金属元素的THQ大小依次为As>Cd>Pb>Hg,而刘烨潼等^[22]研究的天津市菌类风险THQ值为Cd>As>Hg>Pb,与本研究存在差异,王北洪等^[7]的研究结果为As>Cd>Hg>Pb。研究结果存在差异,与香菇样品来源不同和参数选择不一致有关。

3 结论

(1)依据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的限值,Cd、As、Hg、Pb的超标率分别为5.60%、0、0、5.60%。

(2)干食香菇和鲜食香菇重金属含量基本一致。香菇子实体与栽培基质的重金属含量存在极显著相关性,栽培基质重金属含量的高低影响着食用菌中重金属的含量。香菇对Cd表现出较高的富集能力。

(3)经靶标危害系数法计算的成人与儿童经香菇途径摄入4种重金属元素的THQ均值均低于1,大小依次为As>Cd>Pb>Hg,在安全范围内。儿童摄入As的THQ值较高,需引起注意。

参考文献:

[1] 杨文建,赵立艳,安辛欣,等.食用菌营养与保健功能研究进展(综述)[J].食药用菌,2011,19(1):15-18.
YANG Wen-jian, ZHAO Li-yan, AN Xin-xin, et al. Advances in research on nutrition and health functions of edible fungi (review) [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2011, 19(1): 15-18.

[2] 黄晨阳,张金霞.食用菌重金属富集研究进展[J].中国食用菌,2004,23(4):7-9.
HUANG Chen-yang, ZHANG Jin-xia. Studies on heavy metal accumulation in edible mushroom [J]. *Edible Fungi of China*, 2004, 23(4): 7-9.

[3] 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-fu, YANG De-fen. Study on Heavy metal content of edible fungi and its enrichment effect on heavy metals [J]. *Edible Fungi of China*, 1990, 9(6): 14-17.

[4] 朱华玲,班立桐,徐晓萍.食用菌对重金属耐受和富集机理的研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(13):8056-8057.
ZHU Hua-ling, BAN Li-tong, XU Xiao-ping. Study progress on the tolerating and accumulating mechanism of edible mushrooms on heavy metals [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(13): 8056-8057.

[5] 王北洪,马智宏,冯晓元,等.北京市蔬菜重金属含量及健康风险评估[J].食品安全质量检测学报,2015,6(7):2736-2745.
WANG Bei-hong, MA Zhi-hong, FENG Xiao-yuan, et al. Concentrations and health risk evaluation of heavy metals in vegetables in Beijing [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015, 6(7): 2736-2745.

[6] 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,2011,7(20):171-174.
ZHANG Yu-jie, HU Guo-hai, LI Hong-chao. Analysis and assessment of heavy metal pollution in fresh edible mushrooms collected from several areas in Yunnan Province [J]. *Northern Horticulture*, 2011, 7(20): 171-174.

[7] 王北洪,刘静,姚真真,等.栽培食用菌重金属含量的测定及健康风险评估[J].食品安全质量检测学报,2016,7(2):490-496.
WANG Bei-hong, LIU Jing, YAO Zhen-zhen, et al. Determination and health risk evaluation of heavy metals in cultivated edible mushrooms [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2016, 7(2): 490-496.

[8] USEPA. Risk-based concentration table [R]. Philadelphia PA: United States environmental protection agency, Washington DC. 2000.

[9] Song B, Lei M, Chen T B, et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China [J]. *Environ Sci-China*, 2009, 21(12): 1702-1709.

[10] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(3): 1547-1560.

[11] 中国居民营养与慢性病状况报告(2015年) [M].北京:人民卫生出版社,2015.
Report on nutrition and chronic disease status of Chinese residents (2015) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2015.

[12] 金水高.中国居民营养与健康状况调查报告之十:2002营养与健康状况数据集 [M].北京:人民卫生出版社,2008.
JIN Shui-gao. Chinese national nutrition and health survey report (Volume No.10): Dataset of nutrition and health in 2002 [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008.

[13] 王光强,支晓丽,夏永军,等.上海市食用菌重金属污染状况的研

- 究[J]. 工业微生物, 2016, 46(6):20-23.
- WANG Guang-qiang, ZHI Xiao-li, XIA Yong-jun, et al. Heavy metal contents of edible fungi in Shanghai[J]. *Industrial Microbiology*, 2016, 46(6):20-23.
- [14] 陆剑飞, 梁赤周. 浙江省食用菌重金属污染的风险评价[J]. 北京农学院学报, 2014, 29(3):33-37.
- LU Jian-fei, LIANG Chi-zhou. Risk assessment of heavy metal pollution in edible fungi in Zhejiang Province[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2014, 29(3):33-37.
- [15] 陈黎, 刘俊, 张璐, 等. 四川地区食用菌中7种重金属含量测定及污染评价[J]. 食品科学, 2010, 31(16):220-224.
- CHEN Li, LIU Jun, ZHANG Lu, et al. Determination of seven heavy metals and pollution assessment in edible fungi from Sichuan Province[J]. *Food Science*, 2010, 31(16):220-224.
- [16] 李爽, 刘洪田, 袁姗姗, 等. 北京市场常见食用菌重金属含量测定及评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2):584-591.
- LI Shuang, LIU Hao-tian, YUAN Shan-shan, et al. Measurement and assessment of heavy metals in common edible fungi in Beijing market[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2016, 7(2):584-591.
- [17] 邵祥龙, 朱效宁, 成玉萍, 等. 上海市6区县食用菌中铅含量测定及暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(6):892-895.
- SHAO Xiang-long, ZHU Xiao-ning, CHENG Yu-ping, et al. Lead content in edible fungi and the exposure assessment in 6 districts of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2017, 27(6):892-895.
- [18] 徐映如, 沈俊毅, 张颖琦. 上海市虹口区市售食用菌中汞和砷的污染水平[J]. 职业与健康, 2018, 34(7):900-904.
- XU Ying-ru, SHEN Jun-yi, ZHANG Ying-qi. Pollution levels of mercury and arsenic in edible fungi marketed in Hongkou District, Shanghai[J]. *Occupation and Health*, 2018, 34(7):900-904.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Petkovšek 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.
- [22] 刘焯潼, 陈秋生, 张强, 等. 食用菌重金属污染对人体的健康风险分析[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(2):440-443.
- LIU Ye-tong, CHEN Qiu-sheng, ZHANG Qiang, et al. Assessing health risk of heavy metals in mushroom[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(2):440-443.