DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250922003
引用格式: 刘佳, 李永波, 刘婷婷, 等. 2024 年西安市售干菌、鲜菌的重金属污染特征及膳食摄入风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 333–340.
LIU J, LI YB, LIU TT, *et al*. Heavy metal contamination characteristics and dietary intake risk assessment of dried and fresh fungi sold in Xi'an in 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 333–340. (in Chinese with English abstract).

2024 年西安市售干菌、鲜菌的重金属污染特征及膳食摄入风险评估

刘 佳, 李永波, 刘婷婷, 赵雅鑫, 王鑫钰, 李阳阳*
(西安市疾病预防控制中心, 西安 710054)

摘 要: 目的 探讨干菌和鲜菌的重金属污染现状, 并利用重金属食品安全指数(index of food safety, IFS)法和安全边际值(margin of safety, MOS)法来评价食用菌重金属污染物整体状态安全情况和慢性膳食摄入风险。**方法** 利用微波消解-电感耦合等离子体质谱法对随机选取的市售干菌和鲜菌进行重金属(铅、镉、汞、砷、铬)含量测定, 根据膳食摄入风险评估方法评价重金属污染物整体状态安全情况和慢性膳食摄入风险。**结果** 干菌样本总合格率为 84.8%, 鲜菌样本总合格率为 88.0%; 与干菌(校正)比较, 鲜菌中镉浓度显著下降, 铅、汞、铬浓度显著增加(P<0.05)。干菌和鲜菌中各重金属污染物的平均 IFS 值和 $\overline{\text{IFS}}$ 均小于 1; 干菌中铅、镉、砷、铬的最小 MOS<1, 而干菌中其余重金属和鲜菌中各重金属污染物的平均 MOS 和最小 MOS 均大于 1。与干菌整体情况比较, 黑木耳镉的浓度与 IFS 值显著减少, MOS 值显著增加(P<0.05); 与鲜菌整体情况比较, 金针菇铅、镉、汞、铬的浓度与 IFS 值显著减少, MOS 值显著增加, 平菇铅、汞、砷、铬的浓度与 IFS 值显著增加, MOS 值显著减少, 鲜香菇镉、砷的浓度与 IFS 值显著增加, MOS 值显著减少(P<0.05)。**结论** 市售干菌、鲜菌整体的重金属急性膳食摄入风险与慢性膳食摄入风险均在安全范围内, 市售鲜菌更加安全。在干菌中黑木耳的膳食摄入风险更小, 在鲜菌中金针菇的膳食摄入风险更小。

关键词: 食用菌; 重金属污染; 食品安全指数; 安全边际值; 慢性膳食摄入风险

Heavy metal contamination characteristics and dietary intake risk assessment of dried and fresh fungi sold in Xi'an in 2024

LIU Jia, LI Yong-Bo, LIU Ting-Ting, ZHAO Ya-Xin, WANG Xin-Yu, LI Yang-Yang*
(*Xi'an Center for Disease Control and Prevention*, *Xi'an* 710054, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the contamination status of heavy metals in dried and fresh fungi samples and evaluate their overall safety and chronic dietary intake risks using the index of food safety (IFS) and margin of

收稿日期: 2025-09-22
基金项目: 西安市卫生健康委基金项目(2021yb24)
第一作者: 刘佳(1987—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品检验方面研究。E-mail: 314000978@qq.com
***通信作者:** 李阳阳(1995—), 男, 硕士, 主管医师, 主要研究方向为食品监测方面研究。E-mail: liyangyang1325280@163.com

safety (MOS) methods. **Methods** The content of heavy metals (lead, cadmium, mercury, arsenic, chromium) in randomly selected commercially available dried and fresh fungi samples were determined via microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry. The overall safety and chronic dietary intake risks of heavy metal pollutants were assessed using dietary intake risk assessment methods. **Results** The total qualification rate of dried fungi samples was 84.8%, and the total qualification rate of fresh fungi samples was 88.0%. In comparison to dried fungi (corrected), fresh fungi showed a significant decrease in cadmium concentration and a significant increase in lead, mercury and chromium concentrations (P<0.05). The average IFS and $\overline{\text{IFS}}$ values for all heavy metals in both dried and fresh fungi were less than 1. The minimum MOS values of lead, cadmium, arsenic and chromium in dried fungi were less than 1. In contrast, the average and minimum MOS values for other heavy metals in dried fungi and all heavy metals in fresh fungi exceeded 1. Compared with the overall status of dried fungi, black fungus exhibited significantly decreased cadmium concentration and IFS value, along with a significantly increased MOS value (P<0.05). Compared with the overall status of fresh fungi, enoki fungi showed significantly reduced concentrations of lead, cadmium, mercury and chromium, as well as decreased IFS values and increased MOS values. In contrast, oyster fungi demonstrated significantly elevated concentrations of lead, mercury, arsenic and chromium, increased IFS values, and decreased MOS values. Fresh shiitake fungi displayed significantly increased cadmium and arsenic concentrations, higher IFS values and lower MOS values (P<0.05). **Conclusion** The acute and chronic dietary intake risks of heavy metals from both commercially available dried and fresh fungi are within the safe range, with fresh fungi being safer. Among dried fungi, black fungus carry a lower dietary intake risk. Among fresh fungi, enoki fungi present a lower dietary intake risk.

KEY WORDS: edible fungi; heavy metal contamination; index of food safety; margin of safety; chronic dietary intake risk

0 引 言

食用菌因其高蛋白、低脂肪、富含膳食纤维和氨基酸的特性，已成为全球膳食结构中的重要组成部分，具有提高免疫力、抗氧化、降血脂等功效[1–6]。然而，随着工业化和农业集约化进程的加速，环境重金属污染通过栽培基质、灌溉水等途径进入食用菌生长系统[7–9]，进而通过生物富集作用累积于菌体，对食品安全和人体健康构成潜在威胁。

干菌与鲜菌因加工方式差异，其重金属富集特征及膳食暴露风险可能呈现显著分化，但现有研究多集中于单一形态的污染评估，缺乏系统性对比分析，这限制了防控策略的优化。在膳食摄入风险评估中，食品安全指数(index of food safety, IFS)法通过计算食品中污染物含量与安全限值的比值，能够从整体水平评估食品中重金属污染程度，从而更全面、客观地反映食品的真实安全状况[10–11]。安全边际值(margin of safety, MOS)法通过比较重金属实际摄入水平与耐受摄入量的差距，量化风险水平，进而估计重金属污染的慢性膳食摄入风险[12]。

本研究通过整合干菌与鲜菌的重金属污染数据，结合 IFS 法与 MOS 法，系统解析其污染特征及膳食摄入风险差异，旨在为食用菌安全生产标准制定、消费者膳食选择及污染源头管控提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究干菌和鲜菌样品来源于超市、农贸市场、菜店、饭店等环节，覆盖了香菇、木耳、平菇、金针菇等主要消费品种，并尽可能涵盖了不同区县。随机选取市售的干菌(香菇 13 份、黑木耳 11 份、银耳 8 份、竹荪 8 份、猴头菇 5 份、茶树菇 4 份、姬松茸 4 份、花菇 4 份、羊肚菌 4 份、榛蘑 2 份、蛹虫草 2 份、金钱菇 1 份)和鲜菌(金针菇 24 份、平菇 23 份、香菇 17 份、杏鲍菇 12 份、海鲜菇 4 份、鸡腿菇 2 份、白玉菇 1 份)等样品，各菌类采样比例依市场实际消费水平而定。

重金属铅、镉、汞、砷、铬标准品(质量浓度 1000 μg/mL，坛墨质检科技股份有限公司)；优级纯硝酸[重庆川东化工(集团)有限公司]；GBW10015 菠菜、GBW(E)100348 大米粉(中国地质科学院物化探研究所)。

1.2 仪器与设备

ME204E 万分之一电子分析天平(瑞士梅特勒公司)；DFY-500C 摇摆式高速粉碎机(温岭市林大机械有限公司)；

MARS 6 微波消解仪(美国培安公司); iCAPQ 型电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); milli-Q 型纯水仪(美国密利博公司); PE9007 原子吸收仪(美国珀金埃尔默公司); AFS-933 原子荧光仪(北京吉天仪器有限公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　样品前处理

取代表性食用菌样品 2.0 kg, 经粉碎机均质化后取 1.0 kg 分装于样品瓶, –20 ℃冷冻保存待测。

1.3.2　检测流程

(1)检测前处理。精确称取 1.000 g 试样置于聚四氟乙烯消解罐中, 加入 10 mL 硝酸混匀, 于 120 ℃预消解 30 min。冷却后密封, 按梯度升温程序(400 W 维持 5 min→1100 W 维持 3 min)进行微波消解(初始阶段 120 ℃; 中间阶段 150 ℃; 最终阶段 180 ℃)。消解液定容至 50 mL。

空白对照: 消解罐中仅加硝酸, 处理步骤同试样。

电感耦合等离子体质谱条件: 脉冲电压为–1000 V, 模拟电压为–1650 V, 偏转电压为–13 V, 射频功率为 1100 W, 辅助气流量为 1.2 L/min, 等离子体的流量为 18 L/min; 雾化气流量为 0.97 L/min。

(2)标准曲线与检出限。配制砷、铅、镉和铬系列标准溶液(0.5~20.0 μg/L)及汞梯度溶液(0.05~2.00 μg/L)。以 10 次空白测定值的 3 倍标准差计算各元素方法检出限。

(3)加标回收实验。向空白样品中分别添加低、中、高浓度混合标准液(汞: 0.1~1.5 μg/L; 铅、镉、铬、砷: 1~15 μg/L), 按 1.3.1 方法处理后连续 7 次测定, 计算回收率与相对标准偏差, 见表 1。

表 1　方法验证结果

Table 1　Results of method validation

元素	相对原子质量	精密度/%	加标回收率/%	是否合格
铅	207.20	<5	80~120	合格
镉	112.40	<5	80~120	合格
汞	200.60	<5	80~120	合格
砷	74.92	<5	80~120	合格
铬	52.00	<5	80~120	合格

1.4　样品分析

依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》, 任一项重金属含量超标即判定为不合格样品。

1.5　膳食摄入风险评估方法

1.5.1　IFS 法

采用IFS来评价菌类重金属对消费者健康是否存在危害及危害程度, 用 $\overline{\text{IFS}}$ 评估菌类中的各种重金属对消费者健康的总体危害程度[13], 计算见公式(1)~(3)。

$$\text{EDI}_c=R\times F\times E\times P \tag{1}$$

$$\text{IFS}=(\text{EDI}_c\times f)/(\text{SI}_c\times m) \tag{2}$$

$$\overline{\text{IFS}}=\Sigma n_i=1\text{IFS}_{ci}/n \tag{3}$$

式中: R 为重金属 c 的污染水平, mg/kg; F 为估计日摄入量, kg/d, 人均干菌消费量 0.003425 kg/d[14], 人均鲜菌消费量 0.02055 kg/d[14]; E 为可食用部分因子, E=1; P 为加工处理因子, $P_{\text{干菌}}$=10, $P_{\text{鲜菌}}$=1; EDI_c 为重金属 c 的实际日摄入量估算值, mg/d; IFS 为食品安全指数的值; f 为安全摄入量的校正因子, f=1; SI_c 为安全摄入量, 采用每日容许摄入量(allowable daily intake, ADI)值; m 为人体平均体重, kg, 按 63 kg 计算[15]; IFS_{ci} 指农产品 i 中重金属 c 的食品安全指数; n 指重金属的种类。

当 IFS 或 $\overline{\text{IFS}}$<1 时, 表明整体状态安全; 当 IFS 或 $\overline{\text{IFS}}$=1 时, 表明整体状态可接受; 当 IFS 或 $\overline{\text{IFS}}$>1 时, 表明整体状态不可接受。

1.5.2　MOS 法

菌类重金属的慢性膳食摄入风险用 MOS 法评估, 按照式(4)~(5)计算。

$$\text{EXP}=C\times F'\times p\times 7/m \tag{4}$$

$$\text{MOS}=\text{PTWI}/\text{EXP} \tag{5}$$

式中: EXP 为每人每周膳食摄入量的值, μg/kg; C 为样品中某重金属的平均含量, mg/kg; F'为相应食品的人均摄入量, g/d, 人均干菌消费量 3.425 g/d, 人均鲜菌消费量 20.55 g/d; p 为农产品的加工处理因子, $p_{\text{干菌}}$=10, $p_{\text{鲜菌}}$=1; PTWI 为每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake), μg/kg; MOS 为安全边际值。

当 MOS>1 时重金属风险处于可接受水平, 当 MOS≤1 时重金属有一定的健康风险。

1.6　数据处理

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学检验。经正态性检验, 不同菌类中各重金属浓度均不符合正态分布, 不符合正态分布的数据采用 M (P_{25}, P_{75})进行描述, 采用 Mann-Whitney U 检验进行统计比较, 检验水准 α=0.05。

2　结果与分析

2.1　重金属污染现状

由表 2 和表 3 可见, 66 份干菌样本中, 汞和铬的合格率为 100.0%, 铅、镉、砷的合格率分别为 98.5%、87.9%、98.5%, 总合格率为 84.8%, 所有重金属的中位值<平均值, 说明绝大部分干菌样本的重金属含量较低。由表 2 和表 4 可见, 83 份鲜菌样本中, 铬的合格率为 100.0%, 铅、镉、汞、砷的合格率分别为 97.6%、98.8%、92.8%、96.4%, 总合格率为 88.0%, 所有重金属的中位值<平均值, 说明绝大部分鲜菌样本的重金属含量较低。由图 1 可见, 与干菌(校正)比较, 鲜菌中镉浓度显著下降, 铅、汞、铬浓度显著增加, 差异具有统计学意义(P<0.05)。

表 2 各菌类重金属限量

Table 2 Heavy metal limits in various fungi

重金属	菌类	检出限/(mg/kg)	限量/(mg/kg)	检测标准
铅	平菇、香菇、榛蘑	0.0010	0.3	GB 2762—2022
	木耳、银耳(干)		1.0	
	其他		0.5	
镉	香菇	0.0020	0.5	
	羊肚菌、榛蘑		0.6	
	姬松茸		2.0	
	木耳、银耳(干)		0.5	
	其他		0.2	
汞	木耳、银耳(干)	0.0003	0.1	
	其他		0.1	
砷	木耳、银耳(干)	0.0010	0.5	
	其他		0.5	
铬	所有	0.0020	0.5	

注: 干制品中污染物限量应以相应新鲜食品中污染物限量结合其脱水率(90%)折算。

表 3 干菌重金属污染检测结果(n=66)

Table 3 Test results of heavy metal contamination in dried fungi (n=66)

重金属	检出平均值/(mg/kg)	检出最大值/(mg/kg)	检出中值/(mg/kg)	合格率/%	总合格率/%
铅	0.242	6.655	0.090	98.5	84.8
镉	1.244	10.117	0.313	87.9	
汞	0.055	0.963	0.013	100.0	
砷	1.229	11.096	0.220	98.5	
铬	0.460	2.237	0.332	100.0	

表 4 鲜菌重金属污染检测结果(n=83)

Table 4 Test results of heavy metal contamination in fresh fungi (n=83)

重金属	检出平均值/(mg/kg)	检出最大值/(mg/kg)	检出中值/(mg/kg)	合格率/%	总合格率/%
铅	0.041	0.420	0.017	97.6	88.0
镉	0.045	0.336	0.012	98.8	
汞	0.030	0.773	0.005	92.8	
砷	0.084	0.738	0.028	96.4	
铬	0.059	0.268	0.044	100.0	

2.2 重金属污染安全指数

由表 5 可见, 干菌中各重金属污染物的平均 IFS 值为 0.005(铅)~0.097(镉), $\overline{IFS}$ 为 0.034; 干菌中各重金属污染物的最大 IFS 值为 0.105(汞)~0.785(镉), $\overline{IFS}$ 为 0.324。IFS 值和 $\overline{IFS}$ 均小于 1, 这表明干菌重金属污染物整体状态安全。

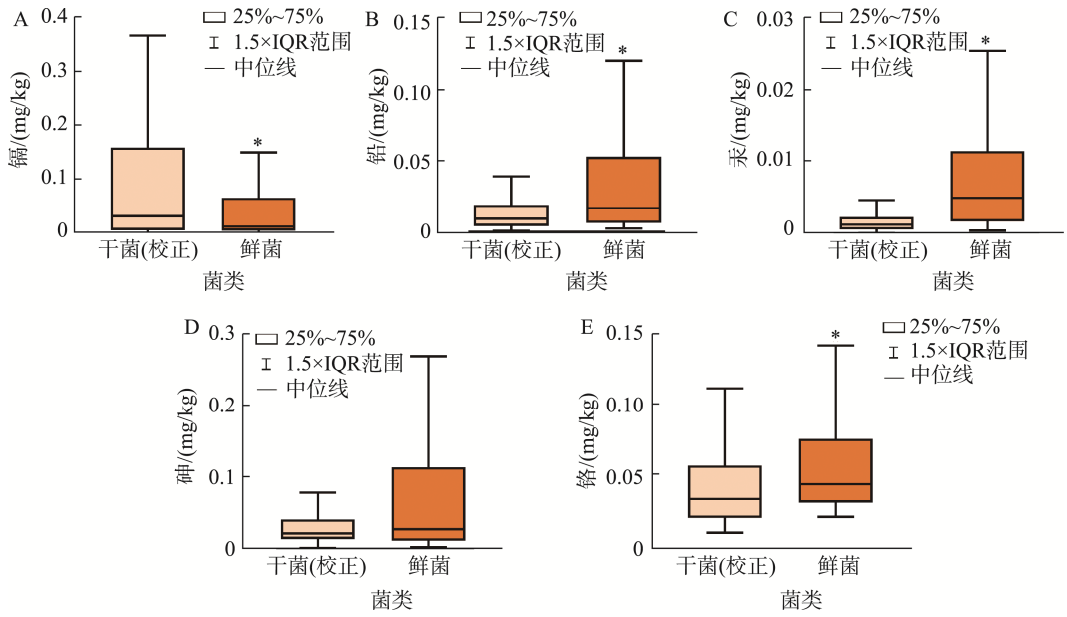
由表 6 可见, 鲜菌中各重金属污染物的平均 IFS 值为 0.0005(铅)~0.0029(铬), $\overline{IFS}$ 为 0.0019; 鲜菌中各重金属污染物的最大 IFS 值为 0.0055(铅)~0.0504(汞), $\overline{IFS}$ 为 0.0202。IFS 值和 $\overline{IFS}$ 均小于 1, 这表明鲜菌重金属污染物整体状态安全。

2.3 重金属污染膳食摄入风险评估结果

由表 7 可见, 干菌中各重金属污染物的平均 MOS 为 7(铬)~301(汞), 最小 MOS 为 0.182(镉)~1.364(汞)。平均 MOS 均大于 1, 而铅、镉、砷、铬的最小 MOS<1。由表 8 可见, 鲜菌中各重金属污染物的平均 MOS 为 70(铬)~1050(铅), 最小 MOS 为 2.8(汞)~26.1(铅)。平均 MOS 和最小 MOS 均大于 1。

2.4 主要菌类重金属污染情况比较

由图 2 可见, 与干菌整体情况比较, 黑木耳镉的浓度与 IFS 值显著减少, MOS 值显著增加, 差异具有统计学意义(P<0.05)。



注: *表示与干菌比较差异显著, $P<0.05$, 图 2~3 同; 干菌(校正)=干菌中重金属含量×(1–脱水率), 脱水率取 90%; IQR 表示四分位数间距(inter quartile range)。

图 1　干菌与鲜菌中重金属含量比

Fig.1　Comparison of heavy metal content in dried and fresh fungi

表 5　干菌重金属污染安全指数

Table 5　Index of safety for heavy metal contamination in dried fungi

重金属	重金属含量/(mg/kg)		ADI/(mg·bw/kg)	IFS		$\overline{IFS}$	
	检出平均值	检出最大值		平均值	最大值	平均值	最大值
铅	0.242	6.655	0.025	0.005	0.145		
镉	1.244	10.117	0.007	0.097	0.785		
汞	0.055	0.963	0.005	0.006	0.105	0.034	0.324
砷	1.229	11.096	0.015	0.023	0.402		
铬	0.460	2.237	0.007	0.037	0.182		

表 6　鲜菌重金属污染安全指数

Table 6　Index of food safety for heavy metal contamination in fresh fungi

重金属	重金属含量/(mg/kg)		ADI/(mg·bw/kg)	IFS		$\overline{IFS}$	
	检出平均值	检出最大值		平均值	最大值	平均值	最大值
铅	0.041	0.420	0.025	0.0005	0.0055		
镉	0.045	0.336	0.007	0.0021	0.0157		
汞	0.030	0.773	0.005	0.0020	0.0504	0.0019	0.0202
砷	0.084	0.738	0.015	0.0018	0.0160		
铬	0.059	0.268	0.007	0.0029	0.0130		

表 7　干菌重金属污染膳食摄入风险评估结果

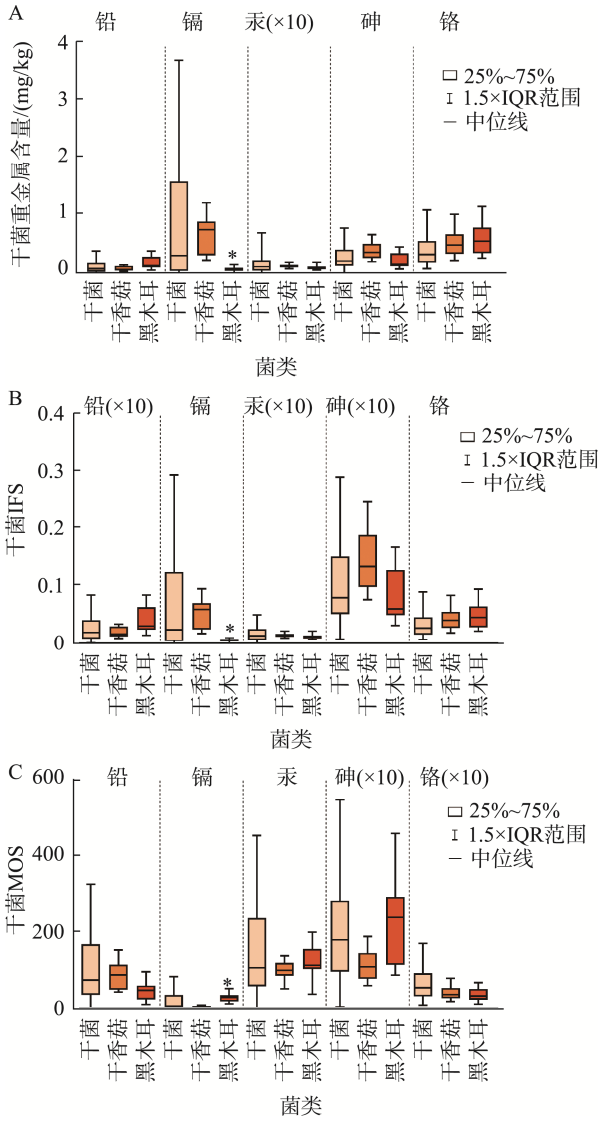
Table 7　Dietary exposure risk assessment results of heavy metal contamination in dried fungi

重金属	重金属含量/(mg/kg)		PTWI/(μg/kg)	EXP		MOS	
	检出平均值	检出最大值		平均值	最大值	平均值	最小值
铅	0.242	6.655	25	0.922	25.3	141	0.987
镉	1.244	10.117	7	4.725	38.5	44	0.182
汞	0.055	0.963	5	0.210	3.7	301	1.364
砷	1.229	11.096	15	2.463	42.2	26	0.355
铬	0.460	2.237	7	1.749	8.5	7	0.787

表 8 鲜菌重金属污染膳食摄入风险评估结果

Table 8 Dietary exposure risk assessment results of heavy metal contamination in fresh fungi

重金属	重金属含量/(mg/kg)		PTWI/(μg/kg)	EXP		MOS	
	检出平均值	检出最大值		平均值	最大值	平均值	最小值
铅	0.041	0.420	25	0.094	0.959	1050	26.1
镉	0.045	0.336	7	0.103	0.767	782	9.1
汞	0.030	0.773	5	0.068	1.772	901	2.8
砷	0.084	0.738	15	0.192	1.687	370	8.9
铬	0.059	0.268	7	0.134	0.612	70	11.0



注：与干菌整体情况比较，*P<0.05；(×N)表示将该重金属元素数值扩大为 N 倍，图 3 同。

图 2 干菌中主要菌类与干菌整体情况的重金属污染情况比较

Fig.2 Comparison of heavy metal contamination in major dried fungi and the overall sample of dried fungi

由图 3 可见，与鲜菌整体情况比较，金针菇铅、镉、汞、铬的浓度与 IFS 值显著减少，MOS 值显著增加，差异具有统计学意义(P<0.05)；与鲜菌整体情况比较，平菇铅、汞、砷、铬的浓度与 IFS 值显著增加，MOS 值显著减少，差异具有统计学意义(P<0.05)；与鲜菌整体情况比较，鲜香菇镉、砷的浓度与 IFS 值显著增加，MOS 值显著减少，差异具有统计学意义(P<0.05)。

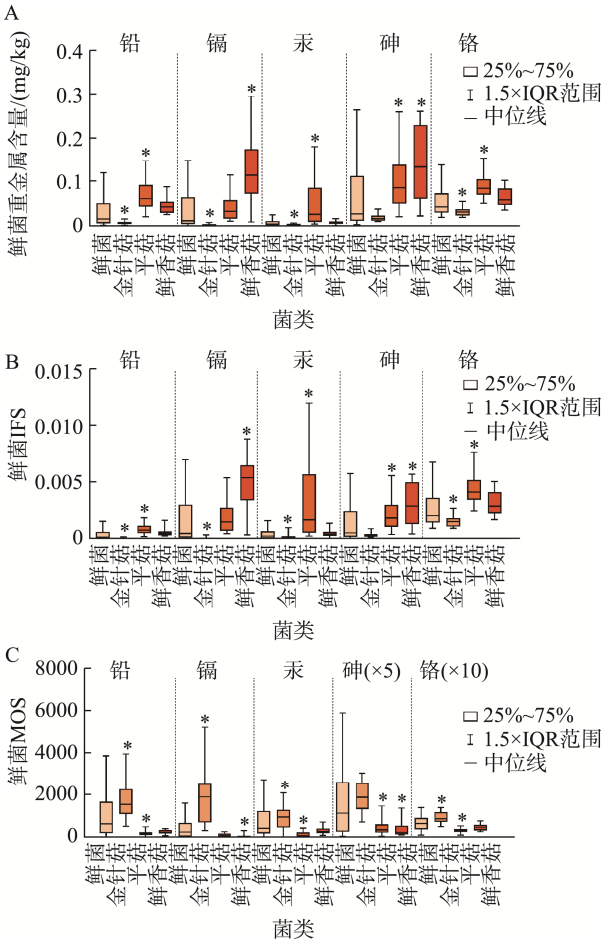


图 3 鲜菌中主要菌类与鲜菌整体情况的重金属污染情况比较

Fig.3 Comparison of heavy metal contamination in major fresh fungi and the overall sample of fresh fungi

3 讨论与结论

本研究的核心目的在于揭示干制与鲜食食用菌作为两类终端商品，在实际消费场景下的重金属污染整体特征，

并结合 IFS 和 MOS 两种风险评估模型, 系统性地评估了其污染现状及膳食暴露风险。尽管干菌和鲜菌中铅、镉、砷的超标现象均存在, 但干菌的总超标率高于鲜菌, 这可能与干制加工过程中水分流失导致浓缩效应有关[16], 例如鲜菌在干燥后质量减少约 90%。然而, 在本研究中干制品中污染物限量以相应新鲜食品中污染物限量结合其脱水率(90%)折算, 即已排除水分流失的影响。此外, 本研究的干菌与鲜菌并非同源配对样品, 因此观测到的含量差异不能直接归因于干制工艺本身。这种差异可能由多种因素共同导致, 如干菌产品通常来自特定产区便于长途运输, 而鲜菌多为本地化供应, 产地环境的差异可能是造成两类产品污染特征不同的原因之一。此外, 镉是干菌中最主要的污染因子, 其合格率最低(87.9%), 且最小 MOS 值小于 1。

作为威胁农业可持续发展的主要原因之一[17–19], 食品中的重金属污染已经成为普遍问题[20]。作为被联合国推荐的健康食品, 食用菌的全球消费一直呈稳定增长趋势[21]。近年来, 我国食用菌产业发展迅速, 产量持续增加[22–23]。然而, 作为膳食结构中的重要组成部分, 与一般农作物相比, 食用菌更易受到重金属污染[24]。考虑到食用菌对人类营养的重要性, 应针对重金属污染和相关健康风险采取适当措施[25]。本研究中, 本研究对相关数据进行了正态性检验, 数据均不符合正态分布。这在食品污染物研究中是常见现象, 因为重金属含量通常存在一个下限, 且易受个别高污染样本的影响, 导致数据呈偏态分布。因此选用中位数和四分位数间距进行统计描述, 能够更稳健、更准确地表征非正态分布数据的集中和离散趋势。首先, 干菌与鲜菌重金属污染特征的差异值得关注。本研究的结果显示, 经校正后, 市售消费量较高的鲜菌中镉浓度显著低于市售消费量较高的干菌, 而铅、汞、铬浓度则显著高于干菌。风险评估结果揭示了不同评价方法的价值与互补性。IFS 法从“产品”角度出发, 评估的是重金属污染物整体的污染状态, 干菌和鲜菌的铅、镉、汞、砷、铬的 IFS 和 $\overline{\text{IFS}}$ 均小于 1, 表明短期内单一及多种重金属通过食用菌摄入的健康风险总体安全可控[26], 这与较高的总合格率结论一致。此外, 干菌的 IFS 和 $\overline{\text{IFS}}$ 值普遍高于鲜菌, 提示长期或大量摄入干菌可能带来累积性风险, 尤其是铅、镉、砷等具有高度生物蓄积性的重金属[27]。然而, IFS 法难以识别单一重金属的突出风险。MOS 法则从“消费者”角度出发, 聚焦于长期膳食摄入带来的慢性健康风险, 它考虑了摄入量这一关键变量, 因此能更敏感地识别出特定人群(高消费量人群)或特定污染物(高含量样品)的风险。本研究的关键发现(干菌中铅、镉、砷、铬的最小 MOS 值小于 1)正是 MOS 法优势的体现。这表明部分干菌的重金属暴露量已接近耐受摄入量[28]。这一发现将合格率(87.9%)所暗示的风险具体化和量化了, 对公共卫生指导具有更明确的意义。此外, 所有重金属的平均 MOS 均大于 1, 这表明从整体消费水平评估, 干菌的慢性膳食摄入风险在安全范围内, 这一积极结果主要归因于大多数样品中重金属的含量处于较低水平。然而, 对特定重金属的最小 MOS 进行分析后, 本研究发现铅、镉、砷、铬这 4 种重金属的最小 MOS 值均小于 1, 其中镉的最小 MOS 值为所有检测元素中最低, 这一发现揭示了虽然干菌整体膳食摄入风险可控, 不影响安全消费, 但仍有一定的进步空间。镉是食用菌中富集的主要重金属[24], 对人体健康具有重大威胁[29–31]。在重庆市的调查结果中, 镉超标率最高的食品是食用菌[32]。

对于市售量最大的五种食用菌(包括干菌的干香菇、黑木耳以及鲜菌的金针菇、平菇和鲜香菇)进行重金属污染风险评估, 结果表明不同菌种对不同重金属元素的富集能力存在显著差异。具体而言, 黑木耳对镉的富集水平较低, 而金针菇则对铅、镉、汞、铬等多种重金属均表现出较低的污染风险。这表明在常规消费水平下, 这两种菌类作为膳食来源的重金属暴露风险相对安全可控。然而, 评估结果也揭示了新的关注点。平菇被发现其铅、汞、砷、铬的水平相对较高, 鲜香菇也表现出较高的镉、砷水平。这一发现提示, 尽管平菇和鲜香菇是广受欢迎的食用菌, 但应避免长期大量食用。

本研究结果对食用菌生产和消费具有实际指导意义。尽管从平均水平看, 市售食用菌的重金属风险安全可控, 但仍需重视干菌制品, 特别是其镉含量的控制。从食品安全角度出发, 建议保持多样化的饮食结构, 避免长期、大量食用单一来源的干菌产品, 以分散可能的健康风险。然而, 本研究未考虑不同菌种对重金属富集能力的差异, 未来需结合菌类品种和产地环境进行更精细化的风险评估。

参考文献

[1] 陈洪雨, 令狐昌丽, 罗颖, 等. 食用真菌蛋白制备及其应用研究进展[J]. 食用菌学报, 2021, 28: 188–98.
CHEN HY, LINGHU CL, LUO Y, *et al*. Research progress on preparation and application of fungal protein [J]. Acta Edulis Fungi, 2021, 28: 188–98.

[2] 孙丹丹, 姜琳琳, 杨啸吟, 等. 食用菌营养价值、功能特性及其在肉制品加工中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2025, 39: 67–75.
SUN DD, JIANG LL, YANG XY, *et al*. Research progress on nutritional value, functional properties and application of edible mushrooms in meat processing [J]. Meat Research, 2025, 39: 67–75.

[3] 秦忠雪, 唐嘉阳, 阮佳. 食用菌粗多糖测定中粗多糖提取方法的优化研究[J]. 预防医学情报杂志, 2021, 37(2): 275–280.
QIN ZX, TANG JY, RUAN J. Optimization of extraction technology of crude polysaccharide from edible fungi [J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2021, 37(2): 275–280.

[4] HU Y, ZHANG ZH, YAN JK, *et al*. Deep processing and comprehensive utilisation of edible mushroom resources [J]. International Journal of Food Science, 2024, 59(12): 9559–61.

[5] WANG MQ, ZHAO RL. A review on nutritional advantages of edible mushrooms and its industrialization development situation in protein meat analogues [J]. Journal of Future Foods, 2023, 3(1-7): 176909.

[6] 邢仕歌, 雍炜, 李永亮, 等. 2020 年北京市售食用菌中重金属含量及健康风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12: 6661–6666.

XING SG, YONG W, LI YL, *et al*. Heavy metals content and human health risks of edible mushrooms sold in Beijing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(16): 6661–6666.

[7] 董照锋, 赵宇, 李娟, 等. 商洛市食用菌重金属污染风险与健康风险评价[J]. 南方农业学报, 2021, 52: 1066–1072.
DONG ZF, ZHAO Y, LI J, *et al*. Assessment on pollution risk and health risk of heavy metal in edible fungi in Shangluo City [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52: 1066–1072.

[8] 饶书恺. 贵州省食用菌重金属含量调查分析及其影响因素的研究[D], 贵阳: 贵州大学, 2021.
RAO SK. Investigation and analysis of heavy metal content in edible mushrooms from guizhou province and study on influencing factors [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.

[9] AB-RHAMAN SMS, NAHER L, SIDDIQUEE S. Mushroom quality related with various substrates' bioaccumulation and translocation of heavy metals [J]. Journal of Fungi (Basel, Switzerland), 2021, 8(1): 42.

[10] 徐晓燕, 孙中叶, 屈凌波. 食品安全指数研究进展 [J]. 农产品加工, 2020(20): 100–102, 105.
XU XY, SUN ZY, QU LB. Food safety index and recent related research in China [J]. Agricultural Products Processing, 2020(20): 100–102, 105.

[11] 李太平, 刘静. 中国食品安全指数的初步测度[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 247–251.
LI TP, LIU J. Preliminary measurement of food safety index in China [J]. Food Science, 2018, 39(19): 247–251.

[12] 梁秀美, 张维一, 陈官菊, 等. 温州市杨梅农药残留与重金属污染特征及膳食摄入风险评估[J]. 浙江农业学报, 2024, 36: 2347–2357.
LIANG XM, ZHANG WY, CHEN GJ, *et al*. Investigation of pesticide residues and heavy metal contamination characteristics and dietary risk assessment of *Myrica rubra* in Wenzhou, China [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36: 2347–2357.

[13] 高琴, 钟攀, 刘纳, 等. 基于 IFS 法评估柑橘中农药残留的风险[J]. 四川农业科技, 2019(4): 32–34.
GAO Q, ZHONG P, LIU N, *et al*. Assessment of pesticide residue risk in citrus using the IFS method [J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2019(4): 32–34.

[14] 路青梅. 我国食用菌行业的网络销售研究[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(6): 522–523, 50.
LU QM. Study on E-marketing of fungus industry in China [J]. Resource Development & Market, 2009, 25(6): 522–523, 50.

[15] 齐艳丽, 李晋栋, 高婧, 等. 戊唑醇及吡唑醚菌酯在玉米上的残留行为及风险评估[J]. 农药学学报, 2020, 22: 115–121.
QI YL, LI JD, GAO J, *et al*. Residue behavior and dietary risk assessment of tebuconazole and pyraclostrobin in corn [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22: 115–121.

[16] 荣胜忠, 叶红婷, 关红军, 等. 不同种类鲜菌、干菌食品中嘌呤含量的比较研究[J]. 中国食物与营养, 2014, 20: 62–64.
RONG SZ, YE HT, GUAN HJ, *et al*. Analysis on purine in different kinds of fresh fungi and dried fungi [J]. Food and Nutrition in China, 2014, 20: 62–64.

[17] HUSN A, HUSSAIN A, SHAH M, *et al*. Heavy metal tolerant endophytic fungi *Aspergillus welwitschiae* improves growth, ceasing metal uptake and strengthening antioxidant system in *Glycine max* L [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(11): 15501–15515.

[18] DENG S, ZHANG X, ZHU Y, *et al*. Recent advances in phyto-combined remediation of heavy metal pollution in soil [J]. Biotechnology Advances, 2024, 72: 108337.

[19] QIN G, NIU Z, YU J, *et al*. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology [J]. Chemosphere, 2021, 267: 129205.

[20] 刘雪芹, 王赤华, 王红亮, 等. 2022—2023 年湖北省 4 类市售食品重金属污染风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16: 310–6.
LIU XQ, WANG CH, WANG HL, *et al*. Risk assessment of heavy metal pollution in 4 types of food in Hubei Province from 2022 to 2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 5, 16(8): 310–316.

[21] 霍永红, 蒋沙沙, 李德海, 等. 食用菌污染因素分析及风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13: 3156–3163.
HUO YH, JIANG SS, LI DH, *et al*. Research progress on factors analysis and risk assessment of pollution in edible fungi [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3156–3163.

[22] 曹斌. 新时代背景下中国香菇消费市场发展特征与趋势[J]. 食用菌学报, 2023, 30(3): 90–102.
CAO B. Characteristics and trend of shiitake mushroom consumption market in China in the New Era [J]. Acta Edulis Fungi, 2023, 30(3): 90–102.

[23] 鲍大鹏, 邹根, 裴晓东, 等. 中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J]. 食用菌学报, 2022, 29: 103–110.
BAO DP, ZOU G, PEI XD, *et al*. Discussion on the path toward high quality modernization of edible fungi industry in China [J]. Acta Edulis Fungi, 2022, 29: 103–110.

[24] LIU Q, ZHENG X, DU R, *et al*. Enrichment characteristics of Cd and Hg and regulation of heavy metal transporter signaling in *Pleurotus ostreatus* [J].The Science of the Total Environment, 2024, 955: 176909.

[25] SIRIC I, KUMAR P, ADELODUN B, *et al*. Risk assessment of heavy metals occurrence in two wild edible oyster mushrooms (*Pleurotus* spp.) collected from Rajaji national park [J]. Journal of Fungi (Basel, Switzerland), 2022, 8(10): 1007.

[26] 刘娅婷, 司闯, 舒利贤, 等. 食品安全评估方法的研究进展[J]. 现代食品, 2024, 30: 33–35.
LIU YT, SI C, SHU LX, *et al*. Research progress on food safety assessment methods [J]. Modern Food, 2024, 30: 33–35.

[27] PENG C, ZHAO X, JI XW. Mixed bacteria passivation for the remediation of arsenic, lead, and cadmium: Medium optimization and mechanisms [J]. Transactions of The Institution of Chemical Engineers. Process Safety and Environmental Protection, Part B, 2023: 170720–170727.

[28] 黄建萍, 陶艳芳, 陈秀斌, 等. 2019—2021 年杭州市居民主要膳食的镉暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2022, 49: 3316–3319.
HUANG JP, TAO YF, CHEN XB, *et al*. Risk assessment of cadmium exposure in the main diets of Hangzhou residents from 2019 to 2021 [J]. Modern Preventive Medicine, 22, 49: 3316–3319.

[29] ZHANG L, WANG C, GUO B, *et al*. Reproductive strategy response of the fungi *Sarocladium* and the evaluation for remediation under stress of heavy metal Cd(II) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 271: 115967.

[30] JOMOVA K, ALOMAR SY, NEPOVIMOVA E, *et al*. Heavy metals: Toxicity and human health effects [J]. Archives of Toxicology, 2025, 99(1): 153–209.

[31] SAAH SA, BOADI NO, SAKYI PO, *et al*. Human health risks of lead, cadmium, and other heavy metals in lipsticks [J]. Heliyon, 2024, 10(23): e40576.

[32] 甘鹏, 吴丽敏, 张鑫, 等. 2011—2021 年重庆市沙坪坝区居民膳食中镉暴露风险评估[J]. 预防医学情报杂志, 2023, 39: 835–841.
GAN P, WU LM, ZHANG X, *et al*. Risk assessment of cadmium dietary exposure among residents in Shapingba District of Chongqing from 2011 to 21 [J]. Journal of Preventive Medicine Information, 23, 39: 835–841.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)