

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020070602

高媛, 徐其静, 苏奇倩, 等. 典型野生食用菌重金属含量及其人体健康风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 223-231.

GAO Yuan, XU Qijing, SU Qiqian, et al. Heavy metals contents and human health risks of typical wild edible mushrooms[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(1): 223-231.

典型野生食用菌重金属含量及其人体健康风险评价*

高媛^{1, 2} 徐其静^{1, 2} 苏奇倩^{1, 2} 张慧娟^{1, 2} 刘雪^{1, 2**}

(1. 西南林业大学环境修复与健康研究院, 昆明, 650224; 2. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明, 650224)

摘 要 土壤重金属污染是影响生态环境、食品安全和人体健康的重要因素. 云南省土壤重金属背景值较高, 且矿产资源丰富、采矿活动频繁, 导致土壤重金属含量较高. 野生食用菌是高效重金属储积器, 云南是中国野生食用菌最大产区. 因此, 本文以云南省 8 种典型野生食用菌为研究对象, 探究其重金属含量(汞、镉、铅、锌、铜、砷)与分配特征, 采用单因子污染指数对其进行重金属污染评价, 利用概率方法(THQ 指数)评估其对不同年龄人群(成人、儿童)的人体健康风险. 研究结果表明, 不同种类野生食用菌重金属含量存在显著差异($P < 0.05$). Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 浓度范围分别为 0.5—7.2、0.3—15.0—26.8、47.7—214、56.7—428 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$; As 未检出. 此外, Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 均主要分布于菌盖. 除虫草花、白森、干巴菌中 Hg 未检出, 其余重金属污染评价中单因子污染指数均 >1 , 且同一元素在同种野生食用菌不同部位污染程度不同, 其中, 老人头菌盖受 Cd 污染最为严重. 基于国家食品安全标准, 本研究中 98% 野生食用菌 Hg、Cd、Pb 含量超标. 然而, THQ 指数表明, 部分野生食用菌中 Zn 无风险($\text{THQ} < 1$), 老人头菌盖、鸡枞菌盖中 Cd、Hg、Pb、Cu 具有人体健康风险($\text{THQ} > 1$), 且风险值儿童 $>$ 成人.

关键词 重金属, 野生食用菌, 含量, 分布, 人体健康风险.

Heavy metals contents and human health risks of typical wild edible mushrooms

GAO Yuan^{1, 2} XU Qijing^{1, 2} • SU Qiqian^{1, 2} ZHANG Huijuan^{1, 2} LIU Xue^{1, 2**}

(1. Institute of Environment Remediation and Health, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China;

2. Institute of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China)

Abstract: Heavy metals pollution poses risks to ecological environment, food safety and human health. Yunnan soils are characterized with high background heavy metals concentrations, together with the rich mining resources and intensive mining activities, rendering the soil is polluted with heavy metals. Wild edible mushrooms are efficient heavy metal accumulators, while Yunnan is the largest and predominant producing area in China. Therefore, the present study was aimed to: 1) investigate heavy metals (Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, As) concentration and distribution in 8 typical wild edible mushrooms; 2) evaluate the heavy metal pollution risk using single factor evaluation index; and 3) evaluate the associated human health risk of different age groups (adults and children) via a

2020 年 7 月 6 日收稿 (Received: July 6, 2020).

* 国家自然科学基金 (41907129, 41867066, 41967023), 国家重点基础研究发展规划项目 (2018YFC1800504), 云南省自然科学基金 (2019FB032) 和云南省教育厅科学研究基金 (2020Y0391, 2020J0406, 2021Y234).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41907129, 41867066, 41967023), State Key Basic R & D Program of China (2018YFC1800504), Natural Science Foundation of Yunnan (2019FB032) and Scientific Research Foundation of Yunnan Education Department (2020Y0391, 2020J0406, 2021Y234).

* ** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 15751868275, E-mail: liuxue20088002@126.com

probabilistic method. The results showed that heavy metals concentrations were significantly different ($P<0.05$) in different mushroom species. The concentrations of Hg, Cd, Pb, Zn, Cu were 0.5—7.2、0.3—15、0—26.8、47.7—214、56.7—428 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dw, while As was undetected. Besides, heavy metals distribution was various among different wild mushroom species, with Hg, Cd, Pb, Zn, Cu were mainly accumulated in the cap. Except Hg in *Cordyceps militaris*、*Grifola frondosa*、*Thelephora ganbajun* was undetected, the single pollution index suggested that Hg, Cd and Pb in the studied wild mushrooms exceeded standards, with *Catathelasma ventricosum* cap being the highest polluted with Cd. Although Hg、Cd、Pb in 98% of the studied edible mushrooms exceed the national food safety standards, the THQ index suggested that Zn has low human health risks ($\text{THQ}<1$) and Hg, Pb and Cu have high risks ($\text{THQ}>1$), with the risk was higher for children than for adults.

Keywords: heavy metals, wild edible mushroom, concentration, distribution, human health risk.

土壤重金属污染对生态环境安全、食品安全和人类健康的潜在影响已引起广泛关注^[1-2].随着我国工业化、城市化、农业高度集约化的快速发展,以及矿产资源过度开发、农田污水灌溉、农药化肥大量施用,土壤污染日益加剧^[3],已成为影响“菜篮子”、“米袋子”、“水缸子”安全和人类健康的重要因素.环境中的重金属因不易被分解、停留时间长、迁移能力差,且具有持久性、致毒性和生物积累性等特征,易通过多种方式在生态系统中迁移、转化并通过食物链富集,进而对人体健康产生潜在危害^[4].汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、砷(As)因其高毒性,被列为优先控制重金属污染物^[5].云南省矿产资源丰富、蕴藏量大、分布广、种类丰富、开发利用程度高,其矿产品出口额占全省出口贸易总额的 47.5%^[6],易在开采、开发过程中产生大量重金属,并通过大气沉降等过程于土壤中富集.且云南省土壤重金属背景值较高,其中 Pb 和锌(Zn)含量分别是全国土壤背景值的 1.91 倍和 1.55 倍^[7].此外,自然因素和人为活动的叠加影响致使云南省土壤重金属污染加剧.

土壤重金属污染引发的食品安全及人体健康风险值得关注.食物摄入是人体接触重金属的最直接来源^[8].野生食用菌因蛋白质、维生素、矿物元素含量丰富且具有较高的药用价值(增加免疫力、控制血脂、抗肿瘤等),被誉为世界十大健康食品之一.我国是世界第一大野生食用菌生产国,年产量占世界总产量的 3/4^[9].云南省因其独特的地质和气候条件,野生食用菌资源丰富,是中国野生食用菌种类最丰富、采集量最大产区,野生食用菌占当地出口食用菌总量 98%以上,贸易总产值近 60 亿且逐年增长.自 20 世纪 70 年代以来,大量研究表明,野生食用菌富集重金属能力极强,远超绿色植物,其重金属含量远高于水果和蔬菜^[10].随着城市化、工业化的发展,野生食用菌受到环境重金属污染的严重影响^[11].野生食用菌重金属污染具有潜在食品安全风险和人体健康风险.云南作为中国野生食用菌主产区,其食用菌的生长环境、食品安全等已引起广泛关注.野生食用菌中重金属主要来源于环境中重金属污染,因特定种类的富集特性,导致重金属含量超标问题尤为突出^[12].因此,有必要对日常的野生食用菌重金属含量进行检测监控,以确保食品安全.

本文通过 X 射线荧光光谱重金属分析仪(XRF),对云南省不同地区典型野生食用菌中重金属(Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、As)含量及分布进行分析,进而利用概率方法(THQ 指数)对野生食用菌重金属含量进行人体健康风险评价,以期对野生食用菌的食品安全风险和人体健康风险评估提供科学依据和基础数据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

于云南省野生食用菌主产地及主要消费地(易门县、武定县)野生食用菌交易中心采集当地典型野生食用菌鲜样 8 种,包括可拆分菌柄、菌盖的 5 种:黑牛肝/茶褐牛肝菌(*Boletus aereus*)($n=24$)、鸡枞(*Collybia albuminosa*)($n=20$)、牛皮菌(*Cantharellus cibarius* Fr.)($n=35$)、姬松茸(*Agaricus blazei* Murr.)($n=23$)、老人头/梭柄乳头菇(*Catathelasma ventricosum*)($n=18$),不可拆分的 3 种:虫草花/珊瑚菌(*Cordyceps militaris*)($n=35$)、白森(*Grifola frondosa*)($n=30$)、干巴菌(*Thelephora ganbajun*)($n=20$).

1.2 重金属含量分析

去除样品表面不可食用部分及根部杂质,用自来水和蒸馏水冲洗,将其分成菌盖和菌柄两部分,于-80 ℃冷冻干燥(Freeze Zone 12,LABCONCO),直至恒重.将冻干样品在液氮保护下研磨至均匀粉体,过100 目尼龙筛网,于-20 ℃储存备用.

样品用 X 射线荧光光谱重金属分析仪(XRF)(EPA 6200)分析测定各重金属含量.采用标准土壤(GBW07401)、芹菜(GBW10048)和湖南大米(GBW10045)对照品进行质量控制,定值与标准值或参考值一致,回收率在 78.3%—116%之间.XRF 检出限如表 1 所示.

表 1 XRF 对各重金属的检出限
Table 1 XRF detection limits for metals

	Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	As
检出限/(mg·kg ⁻¹ dw)	2	0.05	2	4	2	0.05

1.3 野生食用菌重金属污染评价方法

单因子污染指数是当前进行重金属污染指数计算的最常用方法之一,该方法已广泛应用食物(如蔬菜)中重金属污染程度评价^[18].其中,单因子污染指数 P_i 按下述公式计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

(1)

式中, P_i 为重金属污染指数, C_i 为重金属实测浓度, S_i 为重金属评价标准. $P_i \leq 1$,表明无重金属污染; $P_i \geq 1$,表示具有重金属污染,且 P_i 值越大,重金属污染程度越高.

1.4 人体健康风险评价方法

根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762—2017)中规定的食用菌及其制品中 Hg、Cd、Pb 的标准限制分别为 0.1、0.2、1 mg·kg⁻¹ dw.

采用概率方法(THQ)对 8 种野生食用菌样品中重金属的人体健康风险进行计算评估.计算公式如下:

$$THQ = \frac{E_f \times E_d \times C \times F_{IR}}{M_{AB} \times R_{fd} \times T_A} \times 10^{-3}$$

(2)

式中, E_f 为暴露频率(365 d·a⁻¹); E_d 为暴露时间(70 a,为平均寿命)^[13]; F_{IR} 为野生食用菌摄取率(假设摄取量成人为 300 g·d⁻¹,儿童为 100 g·d⁻¹); T_A 是非致癌物的平均暴露时间(365× E_d ,成人为 70 a,儿童为 30 a)^[14]; C 为野生食用菌中重金属含量 mg·kg⁻¹ dw; M_{AB} 为人体平均体重(成人 70 kg,儿童 30 kg); R_{fd} 为重金属参考暴露剂量值.根据 FAO/WHO 标准,野生食用菌中 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 参考暴露剂量值分别为 0.0005、0.001、0.004、0.3、0.04 mg·kg⁻¹ dw.THQ<1,表明野生食用菌中重金属无人体健康风险;THQ>1,则表明野生食用菌中重金属具有人体健康风险,THQ 值越高,其风险越高^[15].

1.5 数据处理

实验结果以 Mean±SD 表示,数据使用 SPSS 21.0 统计分析软件对 8 种野生食用菌各重金属总量及菌盖、菌柄重金属含量进行差异分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行方差分析.图表使用 Origin 8.5 软件制成.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 不同野生食用菌重金属含量差异分析

野生食用菌中 As 含量低于仪器检出限,不作讨论.不同野生食用菌中重金属(Hg、Pb、Cd、Zn、Cu)含量如图 1 所示.结果表明,5 种重金属均超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》标准限值,此外,重金属含量在不同野生食用菌种类间存在显著差异($P<0.05$),且同一野生食用菌不同部位间亦存在显著差异($P<0.05$).

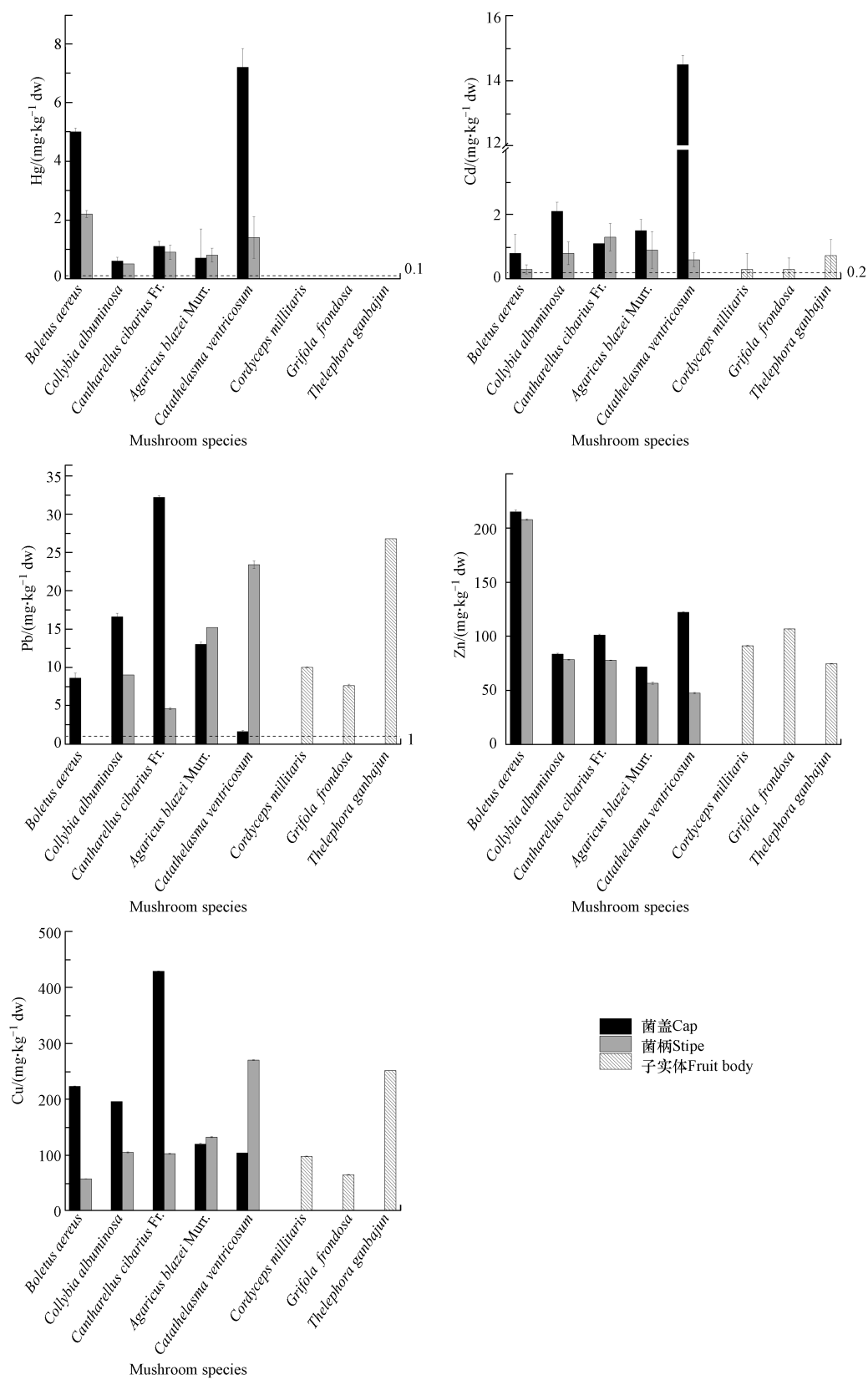


图 1 野生食用菌重金属(Hg, Cd, Pb, Zn, Cu)含量及分布

Fig.1 Heavy metals (Hg, Cd, Pb, Zn, Cu) concentration and distribution in wild edible mushrooms

5 种可拆分野生食用菌(黑牛肝、鸡枞、牛皮菌、姬松茸、老人头)中,菌盖中 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 浓度范围分别为 0.6—7.2、0.8—14.5、1.6—32.2、71.8—214、103—428 mg·kg⁻¹ dw;菌柄中浓度范围分别为

0.5—2.2、0.3—1.3、0—23.4、47.7—207、56.7—269 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 。其中,老人头极易吸收 Hg(菌盖 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)、Cd(菌盖 $14.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),牛皮菌极易吸收 Pb(菌盖 $32.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)、Cu(菌盖 $428 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),黑牛肝最易吸收 Zn(菌盖、菌柄:214、207 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)。此外,除牛皮菌中 Cd、Hg 在菌盖、菌柄间无显著差异($1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $1.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$; $1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),黑牛肝菌 Zn 在菌盖、菌柄间无显著差异($214 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $207 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),其他 4 种野生食用菌中 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 在菌盖、菌柄间均存在显著差异,且表现为:菌盖>菌柄。不能明显拆分菌盖、菌柄的 3 种野生食用菌(虫草花、白森、干巴菌)子实体中 Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 浓度范围分别为 ND、0.3—0.73、7.6—26.8、74.7—106、64—250 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,其中,干巴菌 Pb、Cu 含量显著高于虫草花和白森(Pb: $26.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $7.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$; Cu: $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $96.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 和 $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)。

Hg 积累会对肾脏造成巨大伤害,造成肾功能障碍^[16]。不同种类野生食用菌中 Hg 含量分布不同,除姬松茸菌盖<菌柄($0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ vs. $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)外,其余 4 种可拆分野生食用菌 Hg 分布均表现为:菌盖>菌柄。其中老人头、黑牛肝易吸收积累 Hg,其菌盖中 Hg 含量分别为 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 和 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,其余可拆分野生食用菌菌盖 Hg 含量范围为 $0.6—1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 、菌柄含量范围为 $0.5—0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,而不可拆分的虫草花、白森、干巴菌中均未检出 Hg(图 1)。根据 Ostos 等^[17]研究表明,西班牙 10 种野生食用菌中 Hg 含量为 $0.09—10.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,与本研究 Hg 含量($0—7.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)相近。Falandys 等^[18]研究发现,云南野生牛肝菌中 Hg 含量远高于土壤含量,且与云南山区大气沉降 Hg 含量相关。

Cd 会引起蛋白尿、红细胞减少、高骨周转率、继发性甲状旁腺功能亢进等疾病^[19]。本研究中,5 种可拆分品种(黑牛肝、鸡枞、牛皮菌、姬松茸、老人头)Cd 均高于 3 种不可拆分品种(虫草花、白森、干巴菌),可拆分品种菌盖中 Cd 含量为 $1.1—14.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 、菌柄含量为 $0.3—1.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 。张家树等^[20]调查攀枝花市场牛肝菌 Cd 含量为 $0.09—0.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,与本研究黑牛肝 Cd 含量相似。5 种可拆分品种中,老人头、鸡枞 Cd 含量较高(菌盖 15 、 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),黑牛肝中 Cd 含量较低(菌盖、菌柄分别为 0.8 、 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)。此外,除牛皮菌外,Cd 分布均呈现:菌盖>菌柄(图 1)。林信等^[21]对云南 8 种野生食用菌研究发现,黑牛肝菌 Cd 为 $0.017—1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,与本研究牛肝属中的黑牛肝 Cd 含量 $0.3—0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$ 相近。Isildak 等^[22]研究表明,牛肝菌属(*Boletus badius*)对 As、Pb、Cu、Zn 等具有富集效应。本研究中,老人头 Cd 含量为 $0.6—14.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,显著高于姬松茸 Cd 含量($0.9—1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),表明重金属富集能力具有明显的种间差异。

Pb 是一种有毒元素,对红细胞生成具有阻碍作用,易对儿童中枢神经系统造成危害^[19]。5 种可拆分品种中,牛皮菌、老人头易吸收积累 Pb(牛皮菌菌盖 $32.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,老人头菌柄 $23.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$); 3 种不可拆分品种中,干巴菌 Pb 含量最高(子实体 $26.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)。此外,5 种可拆分品种中,除老人头、姬松茸外,Pb 分布均呈现为:菌盖>菌柄(图 1)。云南省铅锌矿蕴藏丰富,铅锌储量位居全国首位^[23],其野生食用菌中 Pb 含量相比于其他地区较高,土壤 Pb 含量较高可能是造成野生食用菌中 Pb 含量较高的原因。

Zn、Cu 是人体必需营养元素,但 Zn 的过度吸收可抑制 Cu、Fe 吸收,对人体造成危害^[5]。Cu 过量摄入易导致人体迟钝、虚弱,造成呼吸窘迫、贫血和黄疸,以及胃食管区域的肺水肿和溃疡^[24]。5 种可拆分品种中,黑牛肝最易吸收 Zn(菌盖、菌柄分别为 214 、 $207 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$),其次为老人头(菌盖 $122 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$);且均为菌盖>菌柄,与 Wang 等^[25]研究结果(8 种野生菌 Zn 含量:菌盖($77.8—187 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)>菌柄($38.7—118 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$))一致。3 种不可拆分品种中,白森 Zn 含量最高(子实体 $106 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$) (图 1)。

5 种可拆分品种中,牛皮菌(菌盖 $428 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$)、老人头(菌柄 $269 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$) Cu 含量较高,且除老人头、姬松茸外,其余 Cu 分布均呈现:菌盖>菌柄。3 种不可拆分品种中,干巴菌 Cu 含量较高(子实体 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$) (图 1)。本研究中 Cu 含量范围为 $56.7—428 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ dw}$,云南土壤 Cu 背景值是全国土壤 Cu 背景值的 1.5 倍^[26],可能是造成其野生食用菌 Cu 含量较高的原因之一。

由以上研究发现野生食用菌不同部位间重金属含量有区别。本研究中 72% 的野生食用菌中同一种重金属的含量菌盖均高于菌柄。与 Rudawska 等^[27]对 16 种野生食用菌 123 个样品的研究结果中 Cd:菌

盖>菌柄,与 Širić等^[28]研究结果菌盖>菌柄(1.91 mg·kg⁻¹ dw vs. 1 mg·kg⁻¹ dw)一致.KALAC等^[29]研究表明,大多数重金属元素(例如 Cd、Cu 等)在同株野生食用菌中分布不均匀且菌盖大于菌柄.造成这一现象的可能原因是:1)表面吸附过程中,菌盖最先且大量接触大气沉降中重金属;2)高效的自下至上主动运输过程,重金属由菌丝吸收并向上运输积累于菌盖^[30].野生食用菌成熟度不同亦会造成重金属分布的差异.研究发现,菌丝体发育时间与重金属含量具有相关性^[31].

环境因素对野生食用菌中重金属的含量具有一定影响.土壤性质(重金属含量、酸碱度等)对野生食用菌重金属富集具有一定影响.研究表明,未污染土壤中野生食用菌 Cu、Zn 含量低于矿区高污染土壤^[32].此外,土壤酸碱度影响重金属的溶解性,云南土壤呈弱酸性(pH=5.88—6.59)^[6],可增加重金属的溶解性,导致野生食用菌中重金属的吸收与积累.同时,大气沉降也是野生食用菌重金属的重要来源.综上,野生食用菌不同种类、同种类不同部位间的重金属富集程度和含量均有差异且易受环境因素的影响.

2.2 野生食用菌重金属污染评价

根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)(表 2),通过式(1),计算野生食用菌中各重金属的单因子污染指数,结果见表 3.

表 2 野生食用菌重金属污染评价(单因子污染指数 P_i)

	Table 2 Evaluation of heavy metals pollution in wild edible mushrooms (single pollution index P_i)								
	Hg	Cd	Pb	Hg	Cd	Pb	Hg	Cd	Pb
	菌盖 Cap	菌盖 Cap	菌盖 Cap	菌柄 Stipe	菌柄 Stipe	菌柄 Stipe	子实体 Furit body	子实体 Furit body	子实体 Furit body
黑牛肝 <i>Boletus aereus</i>	50.0	4.00	8.60	22.0	1.50	0.00			
鸡枞 <i>Collybia albuminosa</i>	6.00	10.5	16.6	5.00	4.00	9.00			
牛皮菌 <i>Cantharellus cibarius</i> Fr.	11.0	5.50	32.2	9.00	6.50	4.60			
姬松茸 <i>Agaricus blazei</i> Murr.	7.00	7.50	13.0	8.00	4.50	15.2			
老人头 <i>Catathelasma ventricosum</i>	72.0	72.5	1.60	14.0	3.00	23.4			
虫草花 <i>Cordyceps militaris</i>							ND	1.50	10.00
白森 <i>Grifola frondosa</i>							ND	1.50	7.60
干巴菌 <i>Thelephora ganbajun</i>							ND	3.60	26.8

注: * ND: 虫草花、白森、干巴菌中 Hg 未检出,故无单因子污染指数数值.
* ND: Hg in *Cordyceps militaris*, *Grifola frondosa*, *Thelephora ganbajun* was undetected, thus no singer factor pollution values.

表 3 单因子污染指数表明,野生食用菌重金属污染较严重.8 种类野生食用菌中 Cd 均超标(单因子污染指数 $P_i>1$).5 种可拆分菌种中老人头菌盖污染程度最为严重($P_i=72.5$),黑牛肝菌柄 Cd 污染程度最低($P_i=1.5$);除牛皮菌外可拆分菌类中菌帽 Cd 污染均高于菌柄;不可拆分菌种(虫草花、白森、老人头)污染程度较小(P_i 为 1.5—3.6).除黑牛肝菌柄外,其余野生食用菌中 Pb 均超标($P_i>1$);5 种可拆分品种中牛皮菌菌帽中污染程度最严重($P_i=32.2$),鸡枞、牛皮菌为菌盖>菌柄,姬松茸、老人头为菌柄>菌盖;不可拆分 3 种野生食用菌中干巴菌污染程度最严重($P_i=26.8$).可拆分菌种中黑牛肝、鸡枞、牛皮菌、姬松茸、老人头中菌盖、菌柄 Hg 均超标($P_i=6—72$),其中老人头菌盖受 Hg 污染最严重($P_i=72$),除姬松茸 Hg 污染程度菌盖<菌柄($P_i=7$ vs. 8)外,其余野生食用菌中 Hg 污染程度均为菌盖>菌柄;不可拆分 3 种野生菌中 Hg 未检出,故无单因素污染指数评价.

2.3 THQ 人体健康风险评价

《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中 Hg、Cd、Pb 标准限值分别为 0.1、0.2、

1 mg·kg⁻¹ dw(表2).Cu、Zn 作为人体必需元素虽无明确限量,但食用过量亦可造成危害.如图 1 所示,本研究中 8 种野生食用菌中 Hg 含量均超过国家食品安全限量标准,老人头菌盖 Hg 含量超标 72 倍(7.2 mg·kg⁻¹ dw vs. 0.1 mg·kg⁻¹ dw),Hg 含量最低的鸡枞亦超标(菌盖、菌柄分别超标 6 和 5 倍).8 种野生食用菌 Cd 含量均超过国家食品安全限量标准,其中老人头菌盖 Cd 超标 75 倍(15 mg·kg⁻¹ dw vs. 0.2 mg·kg⁻¹ dw),而虫草花和白森中 Cd 含量(0.3 mg·kg⁻¹ dw)低于国家标准限量.除黑牛肝菌盖外,其余野生食用菌中 Pb 含量均超过国家食品安全限量标准,其中牛皮菌菌盖 Pb 含量(32.3 mg·kg⁻¹ dw)超标 32 倍.

根据 THQ 对野生食用菌中各重金属的人体健康风险进行评估.结果表明,8 种野生食用菌 Zn 的 THQ<1,表明 Zn 无人体健康风险,部分样品中 Hg、Cd、Pb、Cu 出现 THQ>1,具有一定的人体健康风险(表2).其中,老人头菌盖中 3 种重金属 Hg、Cd、Cu 人体健康风险较高,且风险值儿童>成人,其儿童 THQ 分别为 15.4、15.5、2.80,成人 THQ 分别为 8.5、8.6、1.52;菌柄中 Hg、Pb、Cu 具有较高人体健康风险,其儿童 THQ 分别为 3.0、6.26、7.22,成人 THQ 分别为 1.65、3.45、3.98.黑牛肝中 Hg 人体健康风险较高,其儿童和成人 THQ 分别为 3.28—7.44 和 1.80—4.10.3 种不可拆分品种(虫草花、白森、干巴菌)重金属人体健康风险较低,其中白森中各重金属均无人体健康风险(THQ=0.95).

人体健康风险评价结果表明,经野生食用菌摄入的 Hg、Cd、Pb、Cu 具有健康风险,且风险值儿童>成人,应格外注意儿童的野生食用菌食用安全.Sorbari 等^[33]研究发现,对 THQ 值影响最大的参数为野生食用菌的食用量及其重金属含量,野生食用菌不同部位重金属 THQ 值随对应的重金属含量变化.随着生活水平逐渐提高,野生食用菌出口量、销售量和摄入量都逐渐增加,为减少野生食用菌中重金属暴露对人体健康造成的危害,应合理、适当控制摄入量.同时,野生食用菌来源也应受到重视,应避免食用来自重金属污染区域的野生食用菌.

表 3 野生食用菌重金属人体健康风险评价(THQ)
Table 3 Human health risks assessments of 8 wild edible mushrooms with enriched heavy metals (THQ)

THQ		Hg		Cd		Pb		Zn		Cu	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
		Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children	Adults	Children
黑牛肝	菌盖	4.10	7.44	0.33	0.60	0.88	1.60	0.29	0.53	2.28	4.14
Boletus aereus	菌柄	1.80	3.28	0.12	0.22	0.00	0.00	0.28	0.52	0.58	1.06
鸡枞	菌盖	0.50	0.90	0.87	1.58	1.72	3.13	0.12	0.21	2.03	3.68
Collybia albuminosa	菌柄	0.42	0.75	0.33	0.60	0.93	1.70	0.11	0.20	1.08	1.96
牛皮菌	菌盖	0.59	1.08	0.30	0.54	2.17	3.94	0.09	0.16	2.89	5.24
Cantharellus cibarius Fr.	菌柄	0.49	0.88	0.35	0.64	0.31	0.56	0.07	0.13	0.69	1.25
姬松茸	菌盖	0.36	0.65	0.39	0.70	0.84	1.52	0.06	0.11	0.77	1.39
Agaricus blazei Murr.	菌柄	0.41	0.75	0.23	0.42	0.98	1.78	0.05	0.09	0.85	1.54
老人头	菌盖	8.50	15.4	8.60	15.5	0.24	0.43	0.24	0.44	1.52	2.80
Catathelasma ventricosum	菌柄	1.65	3.00	0.35	0.64	3.45	6.26	0.09	0.17	3.98	7.22
虫草花 Cordyceps militaris	子实体	ND *	ND	0.15	0.27	1.22	2.22	0.15	0.27	1.19	2.15
白森 Grifola frondosa	子实体	ND	ND	0.08	0.15	0.52	0.95	0.10	0.18	0.44	0.80
干巴菌 Thelephora ganbajun	子实体	ND	ND	0.12	0.21	2.59	4.71	0.10	0.17	2.43	4.40

注: THQ<1,表明野生食用菌中重金属无人体健康风险;THQ>1,表明野生食用菌中重金属具有人体健康风险,THQ 值越高,其风险越高.* ND: 虫草花、白森、干巴菌中 Hg 未检出,故无 THQ 数值.

THQ<1, indicating that heavy metals in wild edible mushrooms have no human health risk; THQ>1, indicating that heavy metals in wild edible mushroom have human health risks. The higher the THQ value, the higher the risk. * ND: Hg in Cordyceps militaris, Grifola frondosa, Thelephora ganbajun was undetected, thus no THQ value.

3 结论(Conclusions)

本研究通过分析不同种类野生食用菌中的重金属含量及分布特征发现,各野生食用菌对不同重金属都具有一定的富集能力.不同野生食用菌重金属含量存在显著差异,同种类菌盖与菌柄重金属含量亦

存在显著差异。Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 的浓度范围分别为 0.5—7.2、0.3—15、0—26.8、47.7—214、56.7—428 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ dw。野生食用菌重金属含量与其生长环境和个体富集特性密切相关。除虫草花、白森、干巴菌中 Hg 未检出,其余野生食用菌重金属污染评价中单因子污染指数均 >1 ,且 98%野生食用菌中重金属超过国家食用安全标准,然而,THQ 指数表明野生菌中 Zn 无人体健康风险($\text{THQ}<1$),个别种类(老人头菌盖、鸡枞菌盖等)中 Cd、Hg、Pb、Cu 具有人体健康风险($\text{THQ}>1$),且风险值儿童 $>$ 成人。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG X, ZHONG T, LIU L, OUYANG X. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. Plos One, 2015, 10(8): e0135182.
- [2] ALLEN L H. Food safety: Heavy metals[J]. Encyclopedia of Human Nutrition, 2013, (2): 331-336.
- [3] MOHAMMED A S, KAPRI A, GOEL R. Heavy metal pollution; Source, impact, and remedie[J]. Biomanagement of Metal-Contaminated Soils, 2011(20): 1-28.
- [4] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
XU Z Q, NIS J, TOU X G, et al. Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environment Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115(in Chinese).
- [5] TCHOUNWOU P B, YEDJOU C G, PATLOLLA A K, et al. Heavy metals toxicity and the environment[J]. EXS, 2012, 101(101): 133.
- [6] 顾济沧, 赵娟. 云南省土壤重金属污染现状及治理技术研究[J]. 环境科学导刊, 2010(5): 70-73.
GU J C, ZHAO J. Status of soil contamination by heavy metals and study on remediation techniques in Yunnan[J]. Environment Science Survey, 2010(5): 70-73(in Chinese).
- [7] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692-703.
ZHANG X M, ZHANG X Y, ZHONG T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environment Science, 2014, 35(2): 692-703(in Chinese).
- [8] 李丹, 高阳俊, 耿春女. 食物链途径人体健康风险评估的关键内容探讨[J]. 环境化学, 2015, 34(3): 431-441.
LI D, GAO Y J, GENG C N. Discussions on the human health risk assessment by food-chain exposure pathways[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(3): 431-441(in Chinese).
- [9] WANG X M, ZHANG J L H, ZHAO Y L, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China[J]. Food Chemistry, 2014, 151(20): 279-285.
- [10] 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(4): 8-10.
HUANG C Y, ZHANG J X. Studies on heavy metal accumulation inedible mushroom[J]. Edible Fungi China, 2004(4): 8-10(in Chinese).
- [11] IGBIRI S, UDOWELLE N A, EKHATOR O C, et al. Edible mushrooms from Niger Delta, Nigeria with heavy metal levels of public health concern: A human health risk assessment[J]. Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture, 2017, 9(1): 31-41.
- [12] BLAGODATSKI A, YATSUNSKAYA M, MIKHAILOVA V, et al. Medicinal mushrooms as an attractive new source of natural compounds for future cancer therapy[J]. Oncotarget, 2018, 9(49): 29259-29274.
- [13] BENNETT D, KASTENBERG W E, MCKONE T E J R E, et al. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: the impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 63(2): 185-198.
- [14] SABA M, FALANDYSZ J, NNOROM I C. Mercury bioaccumulation by *Suillus bovinus* mushroom and probable dietary intake with the mushroom meal[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(16): 16280-16295.
- [15] 高培培, 肖冰, 刘文菊, 等. 莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(2): 362-370.
GAO P P, XIAO B, LIU W J, ZHANG X Y, et al. Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(2): 362-370(in Chinese).
- [16] CHUDZYŃSKI K, JARZYŃSKA G, STEFAŃSKA A, et al. Mercury content and bio-concentration potential of *Slippery Jack*, *Suillus luteus*, mushroom[J]. Food Chemistry, 2011, 125(3): 986-990.
- [17] OSTOS C, PEREZ F, ARROYO B M, et al. Study of mercury content in wild edible mushrooms and its contribution to the Provisional Tolerable Weekly Intake in Spain[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 37: 136-142.
- [18] FALANDYSZ J, ZHANG J, WIEJAK A, et al. Metallic elements and metalloids in *Boletus luridus*, *B. magnificus* and *B. tomentipes* mushrooms from polymetallic soils from SW China[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2017, 142:497-502.
- [19] KLEIN G L J E O H N. Food safety: Heavy metals[J]. Encyclopedia of Human Nutrition, 2005, 271(6): 344-351.
- [20] 张家树, 卢俊霖, 熊联成, 等. 野生菌中金属含量调查与分析[J]. 河南预防医学杂志, 2019, 30(6): 458-460, 483.
ZHANG J S, LU J L, XIONG L C, et al. Investigation and analysis of metal content in wild bacteria[J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2019, 30(6): 458-460, 483(in Chinese).
- [21] 林佑, 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.
LIN J, SUN C, DUAN Z M, et al. Analysis of 13 kinds mineral elements of familiar wild edible fungi in Yunnan province[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2011, 21(6): 1521-1523(in Chinese).
- [22] ISILDAK O T I, ELMASTAS M, et al. Bioaccumulation of heavy metals in some wild-grown edible mushrooms[J]. Analytical Letters, 2007, 40(6): 1099-1116.
- [23] 李志群, 陈耀光, 李伟中, 等. 云南省矿产资源主要矿种及其可持续发展探讨[J]. 矿业快报, 2004, 20(12): 1-4
LI Z Q, CHENG Y G, LI W Z, et al. Discussion on Yunnan Province's main ore species of mineral resources and sustainable development

- tactics[J]. Express Information of Mining Industry, 2004, 20(12): 1-4(in Chinese).
- [24] WANG M Q. Effect and countermeasure of heavy metal pollution on food safety[J]. China Condiment, 2009, 34(11): 32-34.
- [25] WANG B H, LIU J, YAO Z Z, et al. Determination and health risk evaluation of heavy metals in cultivated edible mushrooms[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(2): 490-496.
- [26] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京市:中国环境科学出版社, 1990.
- China National Environmental Monitoring Station. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990(in Chinese).
- [27] RUDAWSKA M, LESKI T. Macro- and microelement contents in fruiting bodies of wild mushrooms from the Nitecka forest in west-central Poland[J]. Food Chemistry, 2005, 92(3): 499-506.
- [28] ŠIRIĆ I, KASAP A, BEDEKOVIC D, FALANDYSZ J. Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia[J]. Journal of Environment Science Health Part B, 2017, 52(3): 156-165.
- [29] KALAC P, SVOBODA L. A review of trace element concentrations in edible mushrooms[J]. Food Chemistry, 2000, 69(3): 273-281.
- [30] 刘朋虎, 赖瑞联, 陈华, 等. 镉对食用菌生长的影响及防控技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 419-428.
- LIU P H, LAI R L, CHEN H, et al. Effects of Cd on edible fungi growth and Cd pollution prevention and control techniques in mushroom production[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(2): 419-428(in Chinese).
- [31] 刘高翔, 杨美智子, 刘洋铭, 等. 食用菌对镉的富集作用及其机理的研究概况[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 392-394.
- LIU G X, YANG M Z Z, LIU Y M, et al. The bioaccumulation characteristics and mechanisms of cadmium in edible mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(13): 392-394(in Chinese).
- [32] MLECZEK M, NIEDZIELSKI P, KALAC P, et al. Multielemental analysis of 20 mushroom species growing near a heavily trafficked road in Poland[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(16): 16280-16295.
- [33] SORBARI I, UDOWELLE N A, EKHATOR O C, et al. Edible mushrooms from Niger Delta, Nigeria with heavy metal levels of public health concern: A human health risk assessment[J]. Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture, 2017, 9(1): 31-41.