

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20220120003

罗增明, 艾雯妍, 尹在晖, 等. 野生鸡枞菌砷、铅和镉的含量与风险评价[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 117-127

Luo Z M, Ai W Y, Yin Z H, et al. Concentration and risk assessment of arsenic, lead and cadmium in wild *Termitomyces albuminous* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(5): 117-127 (in Chinese)

野生鸡枞菌砷、铅和镉的含量与风险评价

罗增明^{1,2}, 艾雯妍², 尹在晖², 刘雪^{1,2}, 徐其静^{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

收稿日期: 2022-01-20 录用日期: 2022-04-20

摘要: 云南省是野生菌的重要产地,亦是土壤重金属高背景区且存在重金属污染问题。野生菌极易从土壤中吸收、积累重金属,并通过食物链传递至人体,具有潜在食品安全风险和人体健康风险。目前围绕“土壤-野生菌-人体”系统重金属迁移及风险评价的研究较少。为此,本研究以云南典型野生鸡枞菌(*Termitomyces albuminous*, *T. albuminous*)及其生长土壤为研究对象,分析鸡枞菌及土壤中砷(As)、铅(Pb)和镉(Cd)的含量与分布特征;分析土壤重金属含量及理化性质(pH、TOC)与鸡枞菌重金属含量的相关关系;通过生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)分析鸡枞菌(菌盖、菌柄)对重金属的富集能力及积累特征;采用单因子污染指数(single factor pollution index, P_i)、综合因子污染指数(comprehensive factor pollution index, P)和靶标危害商数(target hazard quotient, THQ)评价鸡枞菌重金属的潜在食品安全风险与人体健康风险。结果表明, (1)鸡枞菌菌盖 Cd 含量与土壤 pH 及 Cd 含量均呈显著正相关($P<0.01$), TOC 与土壤 Cd 含量呈显著正相关性($P<0.01$); (2)鸡枞菌菌盖和菌柄 As、Pb 和 Cd 检出率为 100%, 超标率为 41.7% ~ 100%, 且菌盖 Pb、Cd 含量均高于菌柄; (3)菌盖和菌柄 $BCF_{As}<1$ 、 $BCF_{Pb}<1$ 、 $BCF_{Cd}=6.53 \sim 307$, 表明鸡枞菌对 Cd 的富集能力较强; (4)所有鸡枞菌样品 P_{Pb} 和 $P_{Cd}>1$, 表明 Pb 和 Cd 含量超过食品卫生三级标准, 为重度 Pb、Cd 污染食品, 且总重金属综合污染指数 $P>2.39$, 表明为中度以上污染, 具有较高的食品安全风险; (5)成人 THQ_{As} 、 THQ_{Pb} 、 $THQ_{Cd}>1$ 占比 50%、100% 和 75%, 儿童 THQ_{As} 、 THQ_{Pb} 、 $THQ_{Cd}>1$ 占比 0%、0% 和 8%, 表明鸡枞菌中 As、Pb 和 Cd 对成人具有潜在人体健康风险, 对儿童无风险或风险较低。

关键词: 重金属; 鸡枞菌; 食品安全风险; 人体健康风险; 富集特征

文章编号: 1673-5897(2022)5-117-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Concentration and Risk Assessment of Arsenic, Lead and Cadmium in Wild *Termitomyces albuminous*

Luo Zengming^{1,2}, Ai Wenyan², Yin Zaihui², Liu Xue^{1,2}, Xu Qijing^{1,2,*}

1. Institute of Environmental Remediation and Health, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

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

Received 20 January 2022 accepted 20 April 2022

Abstract: Yunnan is the mainly producing area of wild mushrooms, which is characterized by high background and potential risk of heavy metals in soils. Wild mushrooms are readily to uptake and accumulate heavy metals

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41907129, 41867066); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0391, 2020J0406); 云南省高端外国专家项目(YNQR-GDWG-2018-017); 大学生创新创业训练计划项目

第一作者: 罗增明(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学, E-mail: lzm527ycjx@163.com

*** 通讯作者 (Corresponding author),** E-mail: xuqijingjing@126.com

from soils, and transport to human bodies via food chain, thus have potential food safety risk and human health risk. However, information on heavy metals transport and the associated risk assessment in soil-wild mushroom-human system is limited. Therefore, this study aims to: (1) Investigate the concentration and distribution of heavy metals including arsenic (As), lead (Pb), cadmium (Cd) in Yunnan typical wild mushroom (*Termitomyces albuminous*, *T. albuminous*) and its growing soils; (2) Analyze the correlation of heavy metals concentration and physico-chemical properties (pH, TOC) of soil with heavy metals concentration of *T. albuminous*; (3) Analyze heavy metals distribution (cap and stipe) and transport ability of *T. albuminous* using bioconcentration factor (BCF); (4) Evaluate the food safety risk and human health risk of heavy metals in *T. albuminous* via single factor pollution index (P_i), comprehensive factor pollution index (P) and target hazard quotient (THQ). The results showed that: (1) Cd concentration in *T. albuminous* cap was positively correlated with soil pH and Cd concentration ($P<0.01$), and soil TOC content was positively correlated with soil Cd concentration ($P<0.01$); (2) As, Pb, and Cd were detected in all *T. albuminous* cap and stipe, with the standard-exceeding ratios being 41.7% ~ 100%, and Pb and Cd concentration were higher in cap than stipe; (3) BCF of As and Pb in cap and stipe were <1 , while BCF_{Cd} was 6.53 ~ 307, indicating that *T. albuminous* can accumulate Cd; (4) P_{Pb} and $P_{Cd}>1$, indicating that *T. albuminous* samples were contaminated at third-level with Pb and Cd; $P>2.39$ indicates heavy metals in *T. albuminous* exceed moderate contamination level, thereby has high food safety risk; (5) the THQ >1 ratio of As, Pb and Cd was 50%, 100% and 75% for adults and 0%, 0% and 8% for children, indicating a high health risk for adults while no or low health risk for children.

Keywords: heavy metals; *Termitomyces albuminous*; food safety risk; human health risk; accumulation characteristic

云南是我国野生菌资源最丰富、出口量最大的地区,已识别野生菌 880 余种,分别占全球和国内野生菌市场的 40% 和 80%,且销往世界各地,出口贸易量占全国 70% 以上,贸易总产值近 60 亿且逐年增长^[1]。其中,典型野生菌品种——鸡枞菌(*Termitomyces albuminous*, *T. albuminous*),又名蚁枞、鸡丝菇等,属担子菌纲,伞菌目,口蘑科,蚁巢伞属^[2]。鸡枞菌风味独特,富含蛋白质、氨基酸、多糖和粗纤维等营养成分,氨基酸种类达 17 种,含量达 28.5%,其中必需氨基酸占比 40.8%,是一种兼具食用和药用价值的高蛋白、低脂肪、低纤维的食用野生菌^[3-4]。鸡枞菌已成为典型高消费野生菌品种,且每年出口创汇长期位居我国单项农产品前列^[5]。

然而,野生菌是高效的重金属蓄积器,极易从土壤中吸收、积累重金属,蓄积能力远超绿色植物^[6-8],导致野生菌重金属污染问题突出。20 世纪初, Kalač 和 Svoboda^[9]已发现某些野生菌可在重金属污染土壤中生存、生长和繁殖,并在子实体中积累高浓度的重(类)金属(As、Pb、Hg、Cd 和 Cr 等)。欧洲地区野生菌重金属含量也超过联合国粮农组织和世界卫生组织(FAO/WHO)规定的每周允许摄入量限值(provisional tolerable weekly intake, PTWI)^[10-12]。中国野生

菌重金属污染问题亦较为突出。四川、云南常见野生菌中 As、Pb、Hg 和 Cd 含量超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)标准限值^[13](表 1),其中 As 含量超出国家标准 14 倍^[14-17],潜在食品安全风险和人体健康风险极高。由于云南土壤重金属背景值偏高,且矿产资源丰富,采、选矿活动的叠加影响,致使土壤重金属污染严重。为此,有必要关注云南典型野生菌品种对重金属的吸收与富集特征,及其潜在的食品安全风险和人体健康风险^[8]。

表 1 食用菌及其制品中重金属的标准限值(GB 2762—2017)

Table 1 Standard limit values of heavy metals in edible mushrooms and the associated products (GB 2762—2017)

食品类别 Food species	重金属类别 Heavy metal species	标准限量 /(mg·kg ⁻¹) Standard limit value /(mg·kg ⁻¹)
新鲜食用菌 (不包含香菇和姬松茸) Fresh edible mushroom, excluding <i>Shiitake</i> and <i>Agaricus blazei</i> Murrill	总 As Total As	0.5
	总 Hg Total Hg	0.1
	Pb	1.0
	Cd	0.2

不同品种野生菌对不同重金属元素的富集能力存在差异^[18],比如,野生牛肝菌对 Cd 和 Pb 具有特异性富集能力,但对 As 和 Hg 富集能力较弱^[19-20],这可能与野生菌生长土壤有关^[21]。研究也已发现野生鸡枞菌 As、Pb 和 Cd 含量超过国家标准限值^[2,20]。重金属超标不利于鸡枞菌的产业发展和经济增长。然而,现有关重金属 As、Pb 和 Cd 的“土壤-鸡枞菌”迁移过程、富集特征及相应风险评价的研究较少。鸡枞菌中 As、Pb 和 Cd 的来源及土壤理化性质对鸡枞菌积累 As、Pb 和 Cd 的影响尚不明确,鸡枞菌中 As、Pb 和 Cd 的食品安全风险和人体健康风险评估鲜有报道。

事实上,国内外对农产品重金属的污染状况、富集特征及其食品安全风险与人体健康风险的研究已建立较好的理论基础和方法学模型。比如,采用生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)评价农产品对重金属的富集能力^[22],采用单因子污染指数(P_i)和综合因子污染指数(P)评价农产品的食品安全风险等级,采样靶标危害商数(target hazard quotient, THQ)评估受污染农产品的人体健康风险。以上评价方法和模型已被广泛应用于粮食和蔬菜等的风险评估中^[23]。

因此,本研究以云南典型野生鸡枞菌及其生长土壤为研究对象,探究鸡枞菌中重金属(As、Pb 和 Cd)的含量与分布特征,揭示土壤理化性质与鸡枞菌吸收和积累重金属的相关关系,并评价其食品安全风险和人体健康风险。具体为:(1)通过测定云南野生鸡枞菌及其生长土壤的重金属含量、土壤理化性质(pH、TOC)等,探讨野生鸡枞菌对重金属的富集能力(BCF)及土壤理化性质的影响;(2)分析鸡枞菌对各重金属(As、Pb 和 Cd)的积累特征及子实体各部位(菌盖和菌柄)的分布规律;(3)采用单因子污染指数(P_i)、综合因子污染指数(P)和靶标危害商数(THQ)评估鸡枞菌中重金属的食品安全风险与人体健康风险。研究结果可为区域野生鸡枞菌重金属的食用安全及吸收阻控提供基础数据,为其他种类野生菌重金属的污染特征及风险评价提供理论参考。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集与分析方法

本研究采集自云南不同点位 12 份野生鸡枞菌及其生长表层(0~20 cm)土壤样品(图 1)。采集的鸡枞菌样品去除不可食用部分,经自来水、蒸馏水依次冲洗至洁净,分为菌盖和菌柄两部分。置于-20℃

冰箱预冻,后经-80℃冷冻干燥(Freeze Zone 12, LABCONCO)24~36 h 至恒重,研磨过筛(100 目)至均匀粉体备用。土壤样品去除石块、植物根系等杂质,经风干后研磨过筛(100 目)至均匀粉体备用。

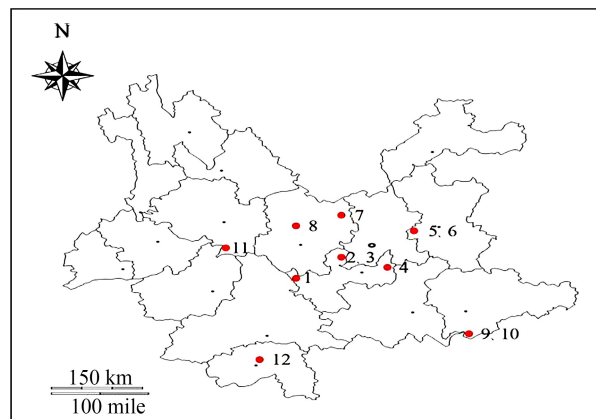


图 1 鸡枞菌采样点分布图

Fig. 1 *T. albuminous* sampling sites

鸡枞菌和土壤样品中重金属(As、Pb 和 Cd)含量采用 X 射线荧光光谱重金属分析仪(XRF, E-max 500, 苏州尚谱环境科学仪器有限公司)分析。称取约 1~1.5 g 鸡枞菌或土壤冻干样品置于模具(样品杯中,手动压实制成直径约 13 mm,厚度<4 mm 的样片,进行检测,各样品测试 3 个平行。采用标准参考物质(Standard Reference Material)土壤(GBW07401)、芹菜(GBW10048)和湖南大米(GBW10045)进行质量控制,标准参考物质重金属回收率为 78.3%~116%,表明仪器准确性和稳定性良好。XRF 对重金属 As、Pb 和 Cd 的检出限分别为 0.38、0.42 和 0.05 mg·kg⁻¹,样品重金属浓度高于检出限,表明 XRF 适于分析本研究的鸡枞菌和土壤样品,所得数据可靠。

土壤有机质(TOC)含量先利用 1 mol·L⁻¹ HCl 去除无机碳后,采用总有机碳分析仪(Elementar Vario TOC, 德国)测定。土壤 pH 值采用 pH 计(Spectrum IQ 160)测定(水土比为 2.5:1)。所有土壤样品在分析测定过程中,均设置标准样品、空白样品和重复样品,确保数据真实可靠。

1.2 生物富集系数

BCF 是农产品中元素含量与表层土壤中该元素含量的比值,反映农产品从土壤或基质中吸收、积累某元素的能力^[10,24]。计算公式^[25]为:

$$BCF = \frac{C_m}{C_s} \quad (1)$$

式中: C_m 为农产品中某元素的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_s 为土壤或基质中该元素的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。BCF>1, 表明农产品对某元素存在富集现象或富集能力较强; BCF<1, 表明农产品对该元素无特异性富集效应。

1.3 食品安全风险评价

本研究采用单因子污染指数法(P_i)和综合因子污染指数法(P)评价野生鸡枞菌的食品安全风险。 P_i 反映农产品中单一重金属的污染水平, 是目前国内评价农产品受某一重金属元素污染程度的最常用方法之一^[18], 计算公式^[23]为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中: P_i 为农产品中第 i 种重金属的污染指数; C_i 为农产品中第 i 种重金属的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为第 i 种重金属在该农产品中的标准限值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据单项污染指数可划分农产品的食品安全等级: $P_i \leq 0.6$, 表明有污染物残留, 含量接近或略高于背景值, 为一级产品(安全); $P_i = 0.6 \sim 1.0$, 表明有较多污染物残留, 为二级产品(轻度污染); $P_i \geq 1.0$, 表明污染物含量超过限量标准, 为三级产品(重度污染), 具有潜在食品安全风险。

P 是一种兼顾单因子污染指数平均值和极值的计权型多因子质量指数, 反映农产品中总重量金属的污染水平, 通常被用于评价存在复合污染时的综合污染水平, 计算公式^[18]为:

$$P = \sqrt{\frac{P_m^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_m 为各项污染指数的平均值; $P_{\max}$ 为最大污染指数。 $P < 1$, 为非污染; $1 < P \leq 2$, 为轻度污染; $2 < P \leq 3$, 为中度污染; $3 < P \leq 5$, 为严重污染; $P > 5$, 为重度污染。

1.4 人体健康风险评价

国内外常用 THQ 评价农产品中重金属的人体健康风险。该方法假定污染物吸收剂量等于摄入量, 以测定的人体摄入污染物剂量与参考剂量的比值作为评价标准, 计算公式^[26]为:

$$\text{THQ} = \frac{E_F \times E_D \times F_{\text{IR}} \times C}{R_{\text{FD}} \times W_{\text{AB}} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: E_F 为暴露频次($\text{次} \cdot \text{a}^{-1}$)。新鲜鸡枞菌作为季节性食物, 每年可采集 3 个月(6—8 月), 人群每周约食用 2 次, 因此 E_F 取 $2(\text{次}) \times 4(\text{周}) \times 3(\text{月}) = 24(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ 。 E_D 为暴露时间(a), 成人取 60 a, 儿童取 6 a。 F_{IR} 为采食量($\text{g} \cdot \text{次}^{-1}$), 成人对新鲜鸡枞菌的采食

量为 $300 \text{ g} \cdot \text{次}^{-1}$ (干质量约 $30 \text{ g} \cdot \text{次}^{-1}$), 儿童采食量为 $100 \text{ g} \cdot \text{次}^{-1}$ (干质量约 $10 \text{ g} \cdot \text{次}^{-1}$)。 C 为鸡枞菌中重金属的浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。 R_{FD} 为参考剂量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。根据美国环境保护局(US EPA)规定, 食用菌中 As、Pb 和 Cd 的 R_{FD} 值分别为 0.0003、0.004 和 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。 W_{AB} 为人体平均体质量, 其中成人取 61.6 kg, 0~6 岁儿童取 18.7 kg^[27]。 T_A 为非遗传毒性致癌物平均暴露天数, 取 $2(\text{次}) \times 4(\text{周}) \times 3(\text{月}) \times 60(\text{年}) = 1440(\text{d})$ 。THQ<1, 表明无显著人体健康风险, THQ>1, 表明存在人体健康风险, 且 THQ 数值越大, 风险越高。

1.5 数据处理

实验结果以“均值±标准偏差”表示, 使用 SPSS 19.0 统计分析软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并用 Duncan 法进行多重比较。显著性水平 P 取 0.05。使用 Origin 9 软件制图。数据相关性分析采用 SPSS 19.0 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 土壤理化性质及重金属含量

土壤是野生菌生长的基质, 直接影响野生菌中重金属的积累量^[28]。因此, 本研究分析了野生鸡枞菌生长表层(0~20 cm)土壤样品重金属 As、Pb 和 Cd 的含量(表 2), 含量分别为 6.81~56、12.4~64 和 0.08~0.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。依据我国生态环境保护部《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定, 农用地其他类土壤重金属 As、Pb 和 Cd 的风险筛选值分别为 40、70、0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \leq 5.5$), 40、90、0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($5.5 < \text{pH} \leq 6.5$), 30、120、0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$); 风险管制值分别为 200、400、1.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \leq 5.5$), 150、500、2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($5.5 < \text{pH} \leq 6.5$), 120、700、3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)^[29]。由表 2 可知, 本研究中仅有 3 份土壤样品 As 和 Cd 达到风险筛选值, 1 份样品 Pb 达到风险筛选值, 其余样品 As、Pb 和 Cd 含量均低于风险筛选值, 且所有样品 As、Pb 和 Cd 含量均未达到风险管制值。茶丽娟等^[21]研究发现, 鸡枞菌生长土壤 Pb 和 Cd 含量分别为 19.8~24.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.26~0.27 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与本研究某些样点结果相近, 但杨天伟等^[30]研究发现, 云南野生牛肝菌生长土壤 Cd 含量为 12~34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于本研究。Sun 等^[26]报道云南野生牛肝菌生长土壤 Pb、Cd 含量分别为 41~69 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 1.31~2.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅 Cd 含量超出国家

表 2 鸡枞菌生长土壤重金属含量、总有机碳 (TOC) 含量和 pH

Table 2 Heavy metals concentration, total organic carbon (TOC) and pH in *T. albuminous* growing soils

样品编号 Sample No.	土壤重金属含量/(mg·kg ⁻¹) Soil heavy metals concentration/(mg·kg ⁻¹)			TOC 百分含量/% Percentage of TOC/%	pH
	As	Pb	Cd		
1	20.9±0.57 ^c	64.4±0.21 ^b	0.31±0.02^c	1.05±0.03 ^c	6.69±0.03 ^a
2	9.03±0.01 ^{ef}	24.4±0.49 ^e	0.08±0.02 ^{fg}	1.81±0.08 ^d	5.46±0.01 ^b
3	42.9±1.06^b	116±5.16^a	0.16±0.01 ^{de}	1.06±0.04 ^c	5.72±0.02 ^b
4	8.98±0.22 ^{ef}	17.1±0.78 ^f	0.09±0.06 ^{ef}	1.08±0.03 ^c	5.08±0.03 ^{bc}
5	56±0.14^a	45.5±0.78 ^c	0.57±0.06^b	3.33±0.19 ^b	7.3±0.05 ^{ab}
6	44.8±2.12^b	43.4±0.85 ^c	0.66±0.06^a	3.73±0.31 ^a	6.58±0.02 ^a
7	14.4±2.83 ^{de}	25.3±2.9 ^e	0.12±0.01 ^{def}	1.15±0.14 ^c	7.13±0.06 ^a
11	19.3±0.14 ^{cd}	34±0.07 ^d	0.19±0.02 ^d	4±0.26 ^a	5.38±0.04 ^b
12	6.81±0.65 ^f	12.4±0.7 ^g	—	2.19±0.27 ^c	4.94±0.03 ^{ab}

注:—表示土壤样品中未检出目标元素。
Note: — indicates that the target element was undetected in soils.

标准,土壤 Pb 含量与本研究相近,Cd 含量高于本研究。由于土壤重金属含量与样品采集地周边人为活动程度有关^[31],因此,同一地区土壤重金属含量可能存在差异。此外,本研究中野生鸡枞菌生长土壤 TOC 含量为 1.05% ~ 4%,pH 值为 4.94 ~ 7.3,与茶丽娟等^[21]研究中鸡枞菌生长土壤 pH 值(5.44 ~ 6.44)相近。同时,符合云南土壤呈弱酸性(pH = 5.88 ~ 6.59)的规律^[32],弱酸性土壤可增加重金属的溶解性和有效性,进而增加其在野生菌中的吸收与积累。

2.2 鸡枞菌重金属含量及分布规律

食品安全国家标准(GB 2762—2017)规定,食用菌及其制品总 As、Pb 和 Cd 含量标准限值分别为 0.5、1 和 0.2 mg·kg⁻¹(表 1)。基于该标准,本研究重点关注云南典型野生鸡枞菌中 As、Pb 和 Cd 含量与分布特征(图 2)。结果表明,鸡枞菌菌盖和菌柄 As、Pb 和 Cd 检出率为 100%,含量分别为 As:0.07 ~ 2.8 mg·kg⁻¹、0.03 ~ 2.46 mg·kg⁻¹;Pb:1 ~ 9.5 mg·kg⁻¹、0.88 ~ 7.58 mg·kg⁻¹;Cd:1.14 ~ 36.1 mg·kg⁻¹、0.66 ~ 27.6 mg·kg⁻¹。菌盖和菌柄超标率分别为 As:41.7% 和 66.7%;Pb:100% 和 91.7%;Cd:100%,表明鸡枞菌中重金属的污染程度依次为 Cd>Pb>As。前期研究报道鸡枞菌子实体 As、Pb 和 Cd 的含量为 0.22 ~ 2.29、0.23 ~ 8.58 和 1.28 ~ 9.95 mg·kg⁻¹,Cd 超标率为 100%,表明鸡枞菌易受 Cd 污染^[20,33-35],需关注其食品安全风险与人体健康风险。

包括鸡枞菌在内的较多野生菌子实体均可分为菌盖和菌柄两部分。研究已表明重金属在野生菌菌盖和菌柄中的含量分布存在差异^[36],通常菌盖部位

高于菌柄^[37]。因此,常以同一元素在野生菌菌盖和菌柄中含量的比值(Q_{CS})来表征其对重金属的转运能力^[19]。本研究中鸡枞菌 Pb 含量 $Q_{CS}>1$ 的样品数占比超过 83.3%,Cd 含量 $Q_{CS}>1$ 的样品占比接近 66.7%,即多数鸡枞菌菌盖 Pb、Cd 含量高于菌柄(表 3),而菌盖和菌柄 As 含量无显著差异($P>0.05$)。肖洋等^[38]的研究表明,鸡枞菌子实体不同部位 As 含量无显著性差异($P>0.05$),而菌盖和菌柄 Pb 含量分别为 1.29 mg·kg⁻¹ 和 0.72 mg·kg⁻¹($Q_{CS}=1.79$),存在显著性差异($P<0.01$)。因此,鸡枞菌菌盖 Pb 和 Cd 含量通常高于菌柄^[39-40]。高媛等^[41]报道了同一种重金属的含量在 72% 的野生菌中也表现为菌盖高于菌

表 3 鸡枞菌菌盖和菌柄重金属浓度的比值(Q_{CS})

Table 3 Ratio of heavy metals concentration in *T. albuminous* cap and stipe (Q_{CS})

样品编号 Sample No.	Q_{CS}		
	As	Pb	Cd
1	0.97	1.33	3.49
2	0.18	1.23	1.13
3	0.95	2.03	0.82
4	0.65	0.76	0.52
5	0.32	1.86	3.02
6	1.6	2.07	0.28
7	0.53	1.14	0.77
8	0.91	0.49	1.84
9	0.63	1.27	2.55
10	0.28	2.04	2.89
11	2.33	1.02	1.28
12	1.20	1.57	1.73

柄。可能因为:(1)在表面吸附过程中,野生菌菌盖优先且大量接触大气沉降中的重金属;(2)高效的自下至上运输过程,野生菌菌丝吸收重金属并转运至菌盖积累^[41-43]。

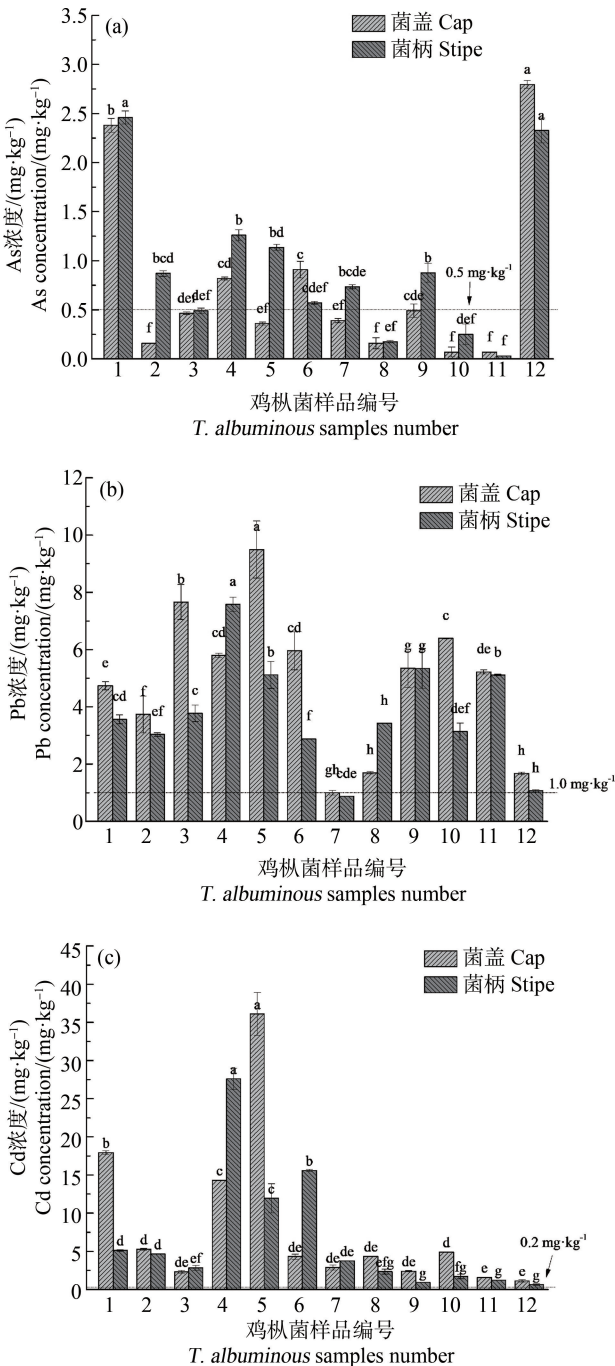


图 2 鸡枞菌菌盖、菌柄 As (a)、Pb (b)、Cd (c) 含量

注:不同小写字母表示与对照组相比,差异显著($P<0.05$)。

Fig. 2 Heavy metals As (a), Pb (b), Cd (c) concentration in *T. albuminous* cap and stipe

Note: Different lower case letters indicate significant difference compared with the control ($P<0.05$).

2.3 鸡枞菌对重金属的富集能力及环境影响因素

不同菌种对同一元素的富集能力不同,同一菌种对不同元素的富集能力亦不同^[2,20]。通常以 BCF 评价野生菌从基质中富集重金属的能力。本研究中鸡枞菌样品 BCF 如表 4 所示。结果表明,云南野生鸡枞菌菌盖和菌柄 As、Pb 和 Cd 的 BCF 分别为 0.002 ~ 0.52、0.03 ~ 0.44 和 6.53 ~ 307,表明鸡枞菌对 Cd 的富集能力极强($BCF>1$),对 As、Pb 的富集效应不显著($BCF<1$)。王润润等^[2]研究指出鸡枞菌富集 Cd 元素的能力较强,富集元素的主要来源之一为土壤。因此,鸡枞菌可能对土壤 Cd 具有特异性富集能力,但富集机制尚不明确。

表 4 鸡枞菌(菌盖、菌柄)对重金属的生物富集系数(BCF)

Table 4 Bioconcentration factor (BCF) of heavy metals in *T. albuminous* cap and stipe

样品编号 Sample No.	子实体 Fruiting bodies	BCF		
		As	Pb	Cd
1	菌盖 Cap	0.11	0.07	57.9
	菌柄 Stipe	0.52	0.06	16.6
2	菌盖 Cap	0.02	0.15	66
	菌柄 Stipe	0.1	0.12	58.3
3	菌盖 Cap	0.01	0.07	14.6
	菌柄 Stipe	0.01	0.03	17.8
4	菌盖 Cap	0.09	0.34	159
	菌柄 Stipe	0.14	0.44	307
5	菌盖 Cap	0.01	0.21	63.3
	菌柄 Stipe	0.02	0.11	21
6	菌盖 Cap	0.02	0.14	6.54
	菌柄 Stipe	0.01	0.07	23.6
7	菌盖 Cap	0.03	0.07	24.1
	菌柄 Stipe	0.05	0.14	31.3
11	菌盖 Cap	0.004	0.15	8.34
	菌柄 Stipe	0.002	0.15	6.53
12	菌盖 Cap	0.41	0.13	—
	菌柄 Stipe	0.34	0.09	—

注:— 表示该鸡枞菌或生长土壤样品未检出重金属元素,故无 BCF 值。
Note:— indicates there is no BCF value because heavy metals were undetected in *T. albuminous* or soil.

野生菌对重金属的富集程度极有可能与土壤、空气和水体等环境因素有关^[20,36,43]。杨天伟等^[30]的研究表明,牛肝菌 Cd 含量与其生长土壤 Cd 含量呈正相关。本研究中,土壤 As、Pb、Cd 及理化性质(pH、TOC)与鸡枞菌中重金属元素的相关关系如表 5 所示。结果表明,鸡枞菌菌盖 Pb 和 Cd 含量与土

壤中 Pb 和 Cd 含量呈显著正相关性($P<0.01$),而鸡枞菌中 As 含量与土壤 As 含量呈负相关,可能与鸡枞菌对 As 不具显著富集效应有关。此外,本研究中土壤 pH 与土壤 Cd 和 Pb 含量呈显著正相关($P<0.01$),TOC 与土壤 Cd 含量呈显著正相关($P<0.01$)。鸡枞菌菌盖 Cd 含量与土壤 Cd 含量和 pH 值均呈显著正相关($P<0.01$),而 TOC 虽与土壤 Cd 含量呈显著正相关($P<0.01$),但与鸡枞菌 Cd 含量相关性不显著,表明土壤中 Cd 可能是鸡枞菌 Cd 的重要来源,且该过程受土壤 pH 的影响。

表 5 重金属含量与土壤理化性质之间的相关性系数

Table 5 Correlation coefficient between heavy metals concentration and soil physicochemical properties

土壤 Soil	土壤 Soil			菌盖 Cap			菌柄 Stipe		
	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
As	-	-	-	-0.261	-	-	-0.282	-	-
Pb	-	-	-	-	0.549* *	-	-	0.037	-
Cd	-	-	-	-	-	0.050* *	-	-	0.296
pH	0.598* *	0.554* *	0.672* *	-0.154	0.275	0.515* *	-0.036	-0.063	-0.009
TOC	0.386*	-0.208	0.564* *	-0.238	0.28	0.087	-0.392*	-0.001	-0.033

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关($n=27$); ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关($n=27$)。
Note: * indicates a significant correlation at 0.05 level (two-sided) ($n=27$); ** indicates a significant correlation at 0.01 level (two-sided) ($n=27$).

2.4 鸡枞菌重金属的食品安全风险评价

P_i 反映野生菌中单项重金属的污染水平, P 反映总体重金属的综合污染水平。鸡枞菌 As、Pb、Cd 的 P_i 和 P 值如表 6 所示。结果表明,鸡枞菌 Pb、Cd 污染较为突出,部分鸡枞菌受 As 污染, P_i 大小依次为 $P_{Cd}>P_{Pb}>P_{As}$ 。其中,近 30% 的鸡枞菌菌盖和/或菌柄的 P_{As} 为 0.06 ~ 0.5 ($P_i \leq 0.6$),表明鸡枞菌中有 As 残留,含量接近或略高于背景值,为一级产品(安全);约 17% 的鸡枞菌菌盖和/或菌柄 P_{As} 为 0.72 ~ 0.98 ($0.6 < P_i < 1.0$),表明 As 残留较多,为二级产品;其余鸡枞菌菌盖和菌柄 P_{As} 、 P_{Pb} 和 P_{Cd} 均 >1 ,表明 As、Pb 和 Cd 含量超过食品卫生标准,为三级产品 ($P_i \geq 1.0$), P_{As} 、 P_{Pb} 和 P_{Cd} 最高值分别达 5.59、9.5 和 89.7,潜在食品安全风险较高^[18,23]。此外,总重金属综合污染指数表明,87.5% 的鸡枞菌样品属于重度重金属污染产品 ($P>5$);超过 8.3% 的样品为严重重金属污染产品 ($3 < P \leq 5$);近 4.2% 的样品为中度重金属污染产品 ($2 < P \leq 3$),食品安全风险较高。

2.5 鸡枞菌重金属的人体健康风险评价

本研究的鸡枞菌菌盖和菌柄均不同程度地受到 As、Pb 和 Cd 的污染,存在食品安全风险,亦存在潜在人体健康风险。采用 THQ 评估不同年龄段(成人、儿童)人群食用鸡枞菌时,因重金属引起的人体健康风险,其值如表 7 所示。结果表明,50% 的鸡枞菌菌柄和菌盖成人 THQ_{As} 为 1.19 ~ 4.54 (>1),表明成人食用鸡枞菌可能因 As 引起健康风险。100%

表 6 鸡枞菌中重金属的单因子污染指数 (P_i) 和综合污染指数 (P)

Table 6 Single factor pollution index (P_i) and comprehensive pollution index (P) of heavy metals in *T. albuminous*

样品编号 Sample No.	子实体 Fruiting bodies	P_i			P
		As	Pb	Cd	
1	菌盖 Cap	4.76	4.74	89.7	65.6
	菌柄 Stipe	4.15	3.56	25.7	19.8
2	菌盖 Cap	0.32	3.74	26.4	20
	菌柄 Stipe	1.74	3.04	23.3	17.8
3	菌盖 Cap	0.93	7.66	11.7	9.54
	菌柄 Stipe	0.98	3.78	14.2	11
4	菌盖 Cap	1.64	5.8	71.5	53.9
	菌柄 Stipe	2.52	7.58	138	104
5	菌盖 Cap	0.72	9.5	181	135
	菌柄 Stipe	2.27	5.12	59.8	45.1
6	菌盖 Cap	1.82	5.96	21.6	16.8
	菌柄 Stipe	1.14	2.88	78	58.4
7	菌盖 Cap	0.78	1.7	14.5	11
	菌柄 Stipe	1.47	3.43	18.8	14.4
8	菌盖 Cap	0.32	1.7	21.7	16.3
	菌柄 Stipe	0.35	3.43	11.8	9.26
9	菌盖 Cap	1.52	2.14	12	2.39
	菌柄 Stipe	2.42	1.68	4.7	4.69
10	菌盖 Cap	0.14	6.4	24.5	18.8
	菌柄 Stipe	0.5	3.14	8.5	6.65
11	菌盖 Cap	0.14	5.22	7.93	6.42
	菌柄 Stipe	0.06	5.11	6.2	5.14
12	菌盖 Cap	5.59	1.67	5.7	5.06
	菌柄 Stipe	4.65	1.07	3.3	3.16

鸡枞菌菌盖和菌柄的成人 $THQ_{Pb}>1$,表明 Pb 的潜在成人人体健康风险较高;75% 鸡枞菌菌柄和菌盖成人 THQ_{Cd} 为 1.14 ~ 17.6(>1),表明鸡枞菌中 Cd 易对成人带来健康风险。对比成人和儿童的风险值可知,除 2 份鸡枞菌样品的儿童 THQ_{Cd} 为 1.48 和 1.93 (>1)存在人体健康风险外,其余鸡枞菌中 Cd 对儿童的健康风险较低($THQ_{Cd}<1$)。此外,儿童的 THQ_{As} 和 THQ_{Pb} 均<1,表明儿童食用鸡枞菌无显著的 As 和 Pb 人体健康风险。

随着自然环境的不断恶化和人为因素带来的环境重金属污染问题,典型野生菌的重金属来源及污染特征、食品安全风险与人体健康风险值得关注。本研究围绕重金属“土壤-鸡枞菌”的迁移及环境影响因子,关注野生菌对重金属的个体积累特征及分布规律,评估野生菌中重金属的食品安全风险与人

体健康风险。结果表明,鸡枞菌菌盖和菌柄 As、Pb 和 Cd 检出率为 100%,含量分别为 2.33 ~ 2.8、0.66 ~ 4.74 和 1.07 ~ 17.9 $mg \cdot kg^{-1}$,总体超标率为 68.8%,其中 Pb 和 Cd 的超标率分别达 96% 和 100%。鸡枞菌菌盖和菌柄 As、Pb 和 Cd 的 BCF 分别为 0.002 ~ 0.52、0.03 ~ 0.44 和 6.53 ~ 307,表明其对 Cd 的富集能力极强($BCF>1$),对 As 和 Pb 的富集效应不显著($BCF<1$)。其次,鸡枞菌菌盖 Pb 和 Cd 含量高于菌柄,表明鸡枞菌可能存在某种高效的自下至上运输重金属的能力,但详细的研究有待深入。鸡枞菌菌盖 Cd 含量与土壤 Cd 含量和 pH 值呈显著正相关($P<0.01$),表明土壤中的 Cd 可能是鸡枞菌中 Cd 的重要来源,且鸡枞菌吸收和积累 Cd 的过程受土壤 pH 影响。此外,污染指数表明,约 92% 鸡枞菌样品均属重度重金属污染产品($P_i>1, P>5$),食品安全等级较

表 7 鸡枞菌菌盖和菌柄中各重金属元素对成人和儿童的健康风险值 (THQ)

Table 7 Human health risk of heavy metals in *T. albuminous* cap and stipe for adults and children

样品编号 Sample No.	子实体 Fruiting bodies	THQ					
		As		Pb		Cd	
		成人 Adult	儿童 Child	成人 Adult	儿童 Child	成人 Adult	儿童 Child
1	菌盖 Cap	3.86	0.42	5.77	0.06	8.73	0.96
	菌柄 Stipe	3.99	0.44	4.34	0.05	2.5	0.27
2	菌盖 Cap	0.26	0.03	4.55	0.05	2.57	0.28
	菌柄 Stipe	1.41	0.16	3.7	0.04	2.27	0.25
3	菌盖 Cap	0.75	0.08	9.33	0.1	1.14	0.12
	菌柄 Stipe	0.8	0.09	4.6	0.05	1.39	0.15
4	菌盖 Cap	1.33	0.15	7.06	0.08	6.96	0.76
	菌柄 Stipe	2.05	0.22	9.23	0.1	13.4	1.48
5	菌盖 Cap	0.58	0.06	11.6	0.13	17.6	1.93
	菌柄 Stipe	1.84	0.2	6.23	0.07	5.82	0.64
6	菌盖 Cap	1.48	0.16	7.26	0.08	2.1	0.23
	菌柄 Stipe	0.93	0.10	3.51	0.04	7.6	0.83
7	菌盖 Cap	0.63	0.07	1.22	0.01	1.41	0.15
	菌柄 Stipe	1.19	0.13	1.07	0.01	1.83	0.2
8	菌盖 Cap	0.26	0.03	2.06	0.02	2.11	0.23
	菌柄 Stipe	0.28	0.03	4.17	0.05	1.14	0.13
9	菌盖 Cap	1.23	0.14	2.61	0.03	1.17	0.13
	菌柄 Stipe	1.96	0.22	2.05	0.02	0.46	0.05
10	菌盖 Cap	0.11	0.01	7.79	0.09	2.39	0.26
	菌柄 Stipe	0.41	0.04	3.82	0.04	0.83	0.09
11	菌盖 Cap	0.11	0.01	6.36	0.07	0.77	0.08
	菌柄 Stipe	0.05	0.01	6.22	0.07	0.6	0.07
12	菌盖 Cap	4.54	0.5	2.04	0.02	0.56	0.06
	菌柄 Stipe	3.78	0.41	1.3	0.01	0.32	0.04

高。50%、100%、75%成人 THQ_{As} 、 THQ_{Pb} 、 THQ_{Cd} >1,表明成人食用鸡枞菌具有As、Pb和Cd人体健康风险;0%、0%、8%儿童 THQ_{As} 、 THQ_{Pb} 、 THQ_{Cd} >1,表明儿童食用鸡枞菌无显著As、Pb和Cd人体健康风险或风险较低。

通讯作者简介:徐其静(1992—),女,硕士,实验师,主要研究方向为环境污染与食品安全。

参考文献(References):

- [1] 刘晓燕. 云南省食用野生菌市场分析[J]. 现代经济信息, 2015(9): 481-482
Liu X Y. Market analysis of edible wild fungi in Yunnan Province [J]. Modern Economic Information, 2015 (9): 481-482 (in Chinese)
- [2] 王润润, 刀兵, 张丽芳, 等. ICP-MS法测定普洱地区3种野生菌重金属含量[J]. 普洱学院学报, 2019, 35(3): 5-9
Wang R R, Dao B, Zhang L F, et al. Determination of heavy metals in three wild mushrooms in Pu'er area by ICP-MS [J]. Journal of Puer University, 2019, 35(3): 5-9 (in Chinese)
- [3] 王逍君, 谷大海, 王雪峰, 等. 五种云南野生食用菌中非挥发性的主要呈味物质比较研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 306-312
Wang X J, Gu D H, Wang X F, et al. Non-volatile flavor substances in five kinds of Yunnan wild edible mushrooms [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 306-312 (in Chinese)
- [4] 张灵芝, 陈健. 鸡枞菌子实体成分的分析与测定[J]. 食品工业科技, 2012, 33(7): 358-361
Zhang L Z, Chen J. Analysis and determination of components in the fruit body of *Collybia albuminosa* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(7): 358-361 (in Chinese)
- [5] 刘佳, 王桂瑛, 程志斌, 等. 云南野生食用菌边角料主要营养成分研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(9): 3767-3772
Liu J, Wang G Y, Cheng Z B, et al. Main nutrients of five kinds of byproducts of wild edible mushrooms in Yunnan [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(9): 3767-3772 (in Chinese)
- [6] Peña-Fernández A, González-Muñoz M J, Lobo-Bedmar M C. Establishing the importance of human health risk assessment for metals and metalloids in urban environments [J]. Environment International, 2014, 72: 176-185
- [7] Melgar M J, Alonso J, García M A. Cadmium in edible mushrooms from NW Spain: Bioconcentration factors and consumer health implications [J]. Food and Chemical Toxicology, 2016, 88: 13-20
- [8] Mleczek M, Siwulski M, Budka A, et al. Toxicological risks and nutritional value of wild edible mushroom species—a half-century monitoring study [J]. Chemosphere, 2021, 263: 128095
- [9] Kalač P, Svoboda L. A review of trace element concentrations in edible mushrooms [J]. Food Chemistry, 2000, 69(3): 273-281
- [10] Kalač P. Trace element contents in European species of wild growing edible mushrooms: A review for the period 2000-2009 [J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 2-15
- [11] Schlecht M T, Säumel I. Wild growing mushrooms for the Edible City? Cadmium and lead content in edible mushrooms harvested within the urban agglomeration of Berlin, Germany [J]. Environmental Pollution, 2015, 204: 298-305
- [12] 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 and Environmental Safety, 2017, 142: 497-502
- [13] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- [14] 张颖, 曹艳茹, 徐恒. 攀枝花野生食用菌重金属含量测定与安全性评价[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(1): 246-252
Zhang Y, Cao Y R, Xu H. Evaluation of heavy metal contents in some wild edible mushrooms from Panzhihua [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2012, 49(1): 246-252 (in Chinese)
- [15] Liu B R, Huang Q, Cai H J, et al. Study of heavy metal concentrations in wild edible mushrooms in Yunnan Province, China [J]. Food Chemistry, 2015, 188: 294-300
- [16] 马培, 张丹, 杨丽标, 等. 野生食用牛肝菌的重金属富集研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(5): 5-8, 140
Ma P, Zhang D, Yang L B, et al. Bioaccumulation of heavy metal in wild edible *Boletus* fruiting body [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(5): 5-8, 140 (in Chinese)
- [17] 邢博, 张霁, 李杰庆, 等. ICP-MS法测定云南省8种野生牛肝菌中矿质元素含量[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 89-94
Xing B, Zhang J, Li J Q, et al. Determination of mineral elements contents in eight wild *Boletus* species from Yunnan by ICP-MS [J]. Food Science, 2016, 37(12): 89-94

- (in Chinese)
- [18] 刘思洁, 牛会坤, 方赤光, 等. 食用菌主要重金属污染及风险评价研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 3206-3211
- Liu S J, Niu H K, Fang C G, et al. Research progress on the main heavy metal pollution and risk assessment of edible mushrooms [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(12): 3206-3211 (in Chinese)
- [19] 庄永亮, 肖俊江, 孙丽平, 等. 食用菌对镉、铅、汞、砷生物富集状况研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(3): 19-32
- Zhuang Y L, Xiao J J, Sun L P, et al. Research progress on bioaccumulation of cadmium, lead, mercury, and arsenic by edible mushroom [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(3): 19-32 (in Chinese)
- [20] 黄晨阳, 陈强, 赵永昌, 等. 云南省主要野生食用菌中重金属调查[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1198-1203
- Huang C Y, Chen Q, Zhao Y C, et al. Investigation on heavy metals of main wild edible mushrooms in Yunnan Province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(6): 1198-1203 (in Chinese)
- [21] 茶丽娟, 赵淑媛, 冯鸿娟, 等. 野生菌生长土壤中重金属形态影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2457-2464
- Cha L J, Zhao S Y, Feng H J, et al. Study on influencing factors of heavy metal forms in wild fungi growth soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2457-2464 (in Chinese)
- [22] Kojta A K, Jarzyńska G, Falandysz J. Mineral composition and heavy metal accumulation capacity of Bay Bolete (*Xerocomus badius*) fruiting bodies collected near a former gold and copper mining area [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 121: 76-82
- [23] 徐梅琼, 李存仙, 胡海梅, 等. 楚雄州常见食用菌重金属污染及安全评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(10): 3773-3779
- Xu M Q, Li C X, Hu H M, et al. Analysis of heavy metals contamination and safety assessment of common edible fungi in Chuxiong [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(10): 3773-3779 (in Chinese)
- [24] García M A, Alonso J, Melgar M J. Bioconcentration of chromium in edible mushrooms: Influence of environmental and genetic factors [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 58: 249-254
- [25] Falandysz J, Drewnowska M. Macro and trace elements in Common Chanterelle (*Cantharellus cibarius*) mushroom from the European background areas in Poland: Composition, accumulation, dietary exposure and data review for species [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2015, 50(5): 374-387
- [26] Sun L P, Chang W D, Bao C J, et al. Metal contents, bioaccumulation, and health risk assessment in wild edible Boletaceae mushrooms [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(6): 1500-1508
- [27] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Integrated risk information system [EB/OL]. [2022-01-20]. <http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg>
- [28] Árvay J, Tomáš J, Hauptvogel M, et al. Contamination of wild-grown edible mushrooms by heavy metals in a former mercury-mining area [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2014, 49(11): 815-827
- [29] 中华人民共和国生态环境保护部. 土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- [30] 杨天伟, 张霁, 刘鸿高, 等. 云南山区野生牛肝菌中重金属汞和镉来源分析及食用安全评估[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 762-770
- Yang T W, Zhang J, Liu H G, et al. Origin and food safety assessment of mercury and cadmium in wild bolete mushrooms from Yunnan mountainous area [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 762-770 (in Chinese)
- [31] 张霁, Martyna Saba, Anna Wiek, 等. 云南野生牛肝菌生长土壤汞含量分布特征[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(8): 85-88, 102
- Zhang J, Saba M, Wiek A, et al. Distribution characteristics of mercury in soil beneath wild grown Boletaceae mushrooms in Yunnan [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(8): 85-88, 102 (in Chinese)
- [32] 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, 29(5): 68-71
- Gu J C, Zhao J. Status of soil contamination by heavy metals and study on remediation techniques in Yunnan [J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(5): 68-71 (in Chinese)
- [33] 罗华, 陈美兰, 林佳, 等. 云南省两种野生鸡枞菌主要营养成分及矿物质元素调查分析[J]. 中国保健营养旬刊, 2013, 12: 691-692
- Luo H, Chen M L, Lin J, et al. Diagnoses of main nutrition component and mineral elements of two kinds of wild edible *Termitomyces* in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Health and Nutrition, 2013, 12: 691-692 (in Chinese)
- [34] 程旭. 大理地区 2011-2012 年市销售野生菌铅汞砷含

- 量分析[J]. 卫生与健康, 2013, 7(12): 46-47
- Chen X. Lead, mercury and arsenic content analysis of wild mushroom in Dali from 2011-2012 [J]. Hygiene & Health, 2013, 7(12): 46-47 (in Chinese)
- [35] 李巍巍. 鸡枞菌食用品质的化学组成基础的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 27-29
- Li W W. Study on the chemical composition contributed to the edible quality of *Termitomyces albuminous* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 27-29 (in Chinese)
- [36] 李丽, 蒋景龙, 季晓晖, 等. 野生食用菌中矿物质和重金属研究概况[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 395-400
- Li L, Jiang J L, Ji X H, et al. A review of minerals and heavy metals in wild edible mushroom [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 395-400 (in Chinese)
- [37] 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, 8062
- Zhu H L, Ban L T, Xu X P. 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, 8062 (in Chinese)
- [38] 肖洋, 李祝, 施渺筱. 粗柄鸡枞菌子实体不同部位营养成分及重金属测定[J]. 中国酿造, 2014, 33(4): 142-144
- Xiao Y, Li Z, Shi M X. Analysis on the nutritional components and heavy metal in different parts of sporocarp in *Termitomyces robustus* [J]. China Brewing, 2014, 33(4): 142-144 (in Chinese)
- [39] 施渺筱, 李祝, 杨坤耀, 等. 野生鸡枞菌子实体不同部位营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(2): 182-183, 199
- Shi M X, Li Z, Yang K Y, et al. Analysis on the nutritional components in different parts of *Termitomyces albuminous* [J]. Food Research and Development, 2012, 33(2): 182-183, 199 (in Chinese)
- [40] 施渺筱, 李祝, 邵静敏, 等. 伞塔菌与鸡枞菌子实体营养成分分析[J]. 食用菌, 2012, 34(1): 59, 62
- [41] 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 Y, Xu Q J, Su Q Q, et al. Heavy metals contents and human health risks of typical wild edible mushrooms [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(1): 223-231 (in Chinese)
- [42] 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 Environmental Sciences, 2019, 28(2): 419-428 (in Chinese)
- [43] 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, 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) ◆