

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210917003

徐其静, 罗增明, 李林, 等. 野生牛肝菌重金属的污染特征及风险评价研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 272-291

Xu Q J, Luo Z M, Li L, et al. Research progress on heavy metals contamination characteristics and risk assessment in wild *Boletus* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(5): 272-291 (in Chinese)

野生牛肝菌重金属的污染特征及风险评价研究进展

徐其静^{1,2}, 罗增明^{1,2}, 李林^{1,2}, 赵宇^{1,2}, 马晟^{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

收稿日期: 2021-09-17 录用日期: 2021-11-08

摘要: 我国土壤重金属污染形势严峻, 以镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)和铅(Pb)污染最为突出。同时, 我国野生牛肝菌资源丰富、出口量大、食用量高, 是国际贸易重要的创汇农副产品。此外, 牛肝菌极易从土壤中吸收并富集重金属, 具有潜在食品安全和人体健康风险。目前关于多种牛肝菌多重金属元素污染特征及其食品安全/人体健康风险评价的系统性综述较少。据此, 本文重点阐述: (1) 市场占有率最大、出口创汇最高的5种野生牛肝菌(美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐牛肝菌)中Cd、Hg、As和Pb的污染特征、个体分布规律(菌盖、菌柄、子实体)及地域性分布差异; (2) 牛肝菌重金属的食品安全风险评价方法(单因子污染指数法(P_i)、内梅罗综合因子污染指数法(P)、生物富集系数(BCF)); (3) 人体健康风险评价方法(日均摄入量评估(EDI)、靶标危害商数法(THQ)、食品安全指数法(IFS)、每周可耐受摄入量(PTWI)), 以及各种评价方法的优点、不足与应用; (4) 基于重金属生物有效性与全量的风险评估结果对比分析。综述内容可为深入探究野生牛肝菌对重金属的吸收富集机制与关键环境影响因子提供理论依据; 提出了基于重金属生物有效性而非重金属总量的风险评价方法; 也为牛肝菌及其他同类野生食用菌对重金属吸收阻控提供了技术支持和方法参考。

关键词: 重金属; 野生牛肝菌; 污染特征; 食品安全; 人体健康

文章编号: 1673-5897(2022)5-272-20 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Research Progress on Heavy Metals Contamination Characteristics and Risk Assessment in Wild *Boletus*

Xu Qijing^{1,2}, Luo Zengming^{1,2}, Li Lin^{1,2}, Zhao Yu^{1,2}, Ma Sheng^{1,2}, Liu Xue^{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 17 September 2021 accepted 8 November 2021

Abstract: Soils are heavily polluted by heavy metals in China, especially by cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As) and lead (Pb). Simultaneously, China is rich in wild *Boletus*, which is an important agricultural product in international trade due to its great exportation and consumption. Nevertheless, wild *Boletus* is readily to uptake and accumulate heavy metals from soils, thereby posing potential food safety risk and health risk to humans. At present, there is limited information on systematically illustrating heavy metals concentration, distribution, food safety risk

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41867066, 41907129); 云南省农业联合专项(202101BD070001-043); 云南省自然科学基金项目(2019FB032); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0391, 2020J0406)

第一作者: 徐其静(1992—), 女, 博士研究生, 研究方向为土壤及食品重金属污染与人体健康风险, E-mail: xuqijingjing@126.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: liuxue20088002@126.com

and human health risk in multi-*Boletus* polluted with multi-heavy metals. As such, this paper aimed to review: (1) the contamination and distribution (cap, stipe, fruiting body) of Cd, Hg, As and Pb in 5 typical wild *Boletus* (*B. edulis*, *B. tomentipes*, *B. speciosu*, *B. griseus*, and *B. impolitus*), which occupying the largest market proportion and exportation, as well as their regional distribution characteristics; (2) food safety risk assessment methods on heavy metals-polluted wild *Boletus*, including single factor pollution index method (P_i), comprehensive factor pollution index method (P), and bioconcentration factor (BCF); (3) human health risk assessment methods on heavy metals-polluted wild *Boletus*, including estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ), international food standard (IFS), and provisional tolerable weekly intake (PTWI), as well as the associated advantages, disadvantages and application; and (4) comparison analysis of human health risk assessment results based on heavy metals bioavailability or total content in wild *Boletus*. This paper helps to better understand the mechanisms and key environmental factors influencing heavy metals uptake and accumulation in wild *Boletus*, and propose more reliable risk assessment method based on heavy metals bioavailability instead of total content. In addition, the information provides theoretical bases and technical supports to prevent and decrease heavy metals uptake and accumulation in wild edible mushrooms besides *Boletus*.

Keywords: heavy metals; wild *Boletus*; contamination characteristics; food safety; human health

野生牛肝菌(*Boletus*)因具有较强的抗氧化性,可抑制癌细胞、降血压和降血脂等,且味道鲜美、风味独特,已成为国内外高消费野生菌品种^[1]。云南省是野生牛肝菌的主产区,牛肝菌年销售量约占全球的65%,产值近6亿元,年均出口创汇达8千万美元^[2],因此,野生牛肝菌已成为国际贸易中重要的创汇农副产品,作为区域特色产品,对于区域特色产业推广和经济发展具有重要推动作用^[3]。其中,美味牛肝菌(*Boletus edulis*, *B. edulis*)、绒柄牛肝菌(*Boletus tomentipes*, *B. tomentipes*)、小美牛肝菌(*Boletus speciosu*, *B. speciosu*)、灰褐牛肝菌(*Boletus griseus*, *B. griseus*)和黄褐牛肝菌(*Boletus impolitus*, *B. impolitus*)是市场消费量较大、出口创汇较高的野生牛肝菌品种^[4]。

然而,包括牛肝菌在内的野生菌是重金属的高效蓄积器,极易从土壤中吸收和富集重金属,并可通过食物链传递至人体,威胁人类健康。此外,野生菌富集重金属的能力高于一般作物,加之自然环境不断恶化和人为环境污染,野生菌重金属污染问题日益突出^[5]。重金属超标严重影响其品质、食用安全及出口贸易等。目前,重金属含量超标已被认为是野生菌食品安全中最为突出且难以解决的问题之一^[6]。据此,有必要分析野生菌中重金属的污染特征、个体分配规律及地域性分布差异,以探寻有效降低其积累的途径。

野生菌受重金属的污染情况国内外均有报道。研究表明,野生菌在生长过程中对镉(Cd)、汞(Hg)、

砷(As)和铅(Pb)4种高毒性重金属有极强的富集能力^[7-10]。近10年,仅野生牛肝菌中Cd、Hg、As和Pb含量的报道有50余篇,研究者重点关注各地区野生牛肝菌中4种重金属的含量,并对其食品安全风险及食用人群的人体健康风险进行评估。然而,关于多种牛肝菌多重金属元素污染特征及其食品安全/人体健康风险评估的系统性综述较少。对于重金属的“环境-牛肝菌-人体”系统的迁移、转化及其生物有效性方面的研究仍不充分,尤其是野生牛肝菌对重金属的富集过程和作用机制研究不足;不同品种和产地来源的野生牛肝菌对Cd、Hg、As和Pb富集效应的差异性研究较少^[11-12];各牛肝菌中重金属的个体污染特征及地域性污染差异研究不足。然而,这些信息对于深入探究野生牛肝菌对重金属的吸收、累积、解毒机制及相应的生态毒理风险具有重要的理论意义。此外,目前研究多以重金属的全量为基础评价食品安全/人体健康风险,可能导致风险被高估。相较于全量,生物有效性能更好地反映食物中重金属进入人体胃液、肠液及血液被吸收的量。因而,可基于重金属的生物有效性,建立更为科学、可靠的野生牛肝菌重金属食品安全/人体健康风险评估方法。

因此,本文基于前人研究基础,综述了美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐5种常见野生牛肝菌中Cd、Hg、As和Pb的元素污染特征、个体分配规律及地域性分布差异,为野生牛肝菌的可采食品种、部位及产地提供基础信息,为深入探究不同品种的野生牛

肝菌对 Cd、Hg、As 和 Pb 的吸收积累机制及污染防治提供重要数据。其次,本文讨论了野生牛肝菌中 Cd、Hg、As 和 Pb 的食品安全/人体健康风险评估进展,为野生菌重金属污染的生态毒理风险评估提供理论依据和方法参考。综上,本文内容可为野生牛肝菌中重金属的来源及其食品安全/人体健康风险评估提供可行的方法参考,进而为区域野生菌产业发展、出口贸易及人类饮食健康提供基础支撑。

1 野生牛肝菌重金属污染特征 (Heavy metal contamination characteristics of wild *Boletus*)

1.1 野生牛肝菌 Cd 污染特征

Cd 是野生牛肝菌最容易富集的元素之一,美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐 5 种牛肝菌中 Cd 含量为 $0.05 \sim 40.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)^[13-31],大部分含量超过《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[32]规定的食用菌及其制品中 Cd 的标准限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。其中,灰褐牛肝菌和美味牛肝菌富集 Cd 的能力最强,其食品安全/人体健康风险值得关注。此外,野生牛肝菌 Cd 含量表现出明显的个体和地域性分布差异,子实体盖和柄各部位 Cd 含量的差异也较为显著。

目前,研究报道的 5 种野生牛肝菌对 Cd 的富集能力依次为美味牛肝菌>灰褐牛肝菌>小美牛肝菌>绒柄牛肝菌>黄褐牛肝菌,Cd 含量范围分别为 $0.05 \sim 40.2$ 、 $0.017 \sim 25.0$ 、 $0.03 \sim 24.9$ 、 $0.18 \sim 20.5$ 和 $0.20 \sim 9.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高 Cd 含量分别为国家标准的 201 倍、125 倍、124 倍、103 倍和 47 倍^[13-31]。因此,野生牛肝菌对 Cd 元素具有特异性富集效应,可能是 Cd 的高效生物蓄积器^[33-34],其吸收和富集 Cd 的机制与阻控应引起重视。

由表 1 可知,野生牛肝菌盖和柄 Cd 含量的差异显著,表现为盖(cap)含量高于柄(stipe)。通常以同一元素在野生菌盖和柄中含量的比值($Q_{C/S}$)来表征其对重金属的转运能力^[35]。中国地区中,云南美味、灰褐、绒柄和小美牛肝菌中 Cd 的 $Q_{C/S}$ 值分别为 $0.81 \sim 8.43$ 、 $1.34 \sim 2.01$ 、 $0.97 \sim 2.2$ 和 2.48 ,超过 91% 的野生牛肝菌 Cd 的 $Q_{C/S}$ 值 >1 ^[14,17-18,21-22,24]。四川西昌的美味和灰褐牛肝菌,以及四川攀枝花的绒柄牛肝菌中 Cd 含量的 $Q_{C/S}$ 值分别为 1.0、1.6 和 1.31^[11,26]。克罗地亚的美味牛肝菌中 Cd 含量的 $Q_{C/S}$ 值为 1.12^[23]。贵州野生牛肝菌 Cd 含量的 $Q_{C/S}$ 值高达 7.9^[36]。此外,庄永亮等^[35]报道的 19 种野生牛肝

菌中除虎皮粘盖牛肝菌 Cd 含量的 $Q_{C/S}$ 值 <1 ,其余牛肝菌子实体 Cd 含量的 $Q_{C/S}$ 值均 >1 ,表明野生牛肝菌盖对 Cd 的富集能力普遍高于柄。准确分析重金属在野生菌盖和柄中的含量差异,对于揭示其重金属的污染特征及转运富集机制具有重要作用。然而,目前尚缺少详细的研究解释 Cd 元素富集于野生牛肝菌菌盖部位是否与 Cd 元素的来源和/或牛肝菌解毒机制有关。

此外,表 1 中提供的数据信息还反映了不同产地来源的野生牛肝菌中 Cd 元素的含量存在差异。按种类划分,中国地区美味牛肝菌 Cd 含量表现为云南昆明>云南玉溪>云南保山>云南大理>云南楚雄>云南迪庆>云南文山>云南曲靖>云南普洱>四川西昌;灰褐牛肝菌为云南曲靖>云南宣威>四川西昌>云南楚雄>云南昆明>云南玉溪>云南红河>云南文山>云南普洱;小美牛肝菌为云南保山>云南玉溪>云南昆明;绒柄牛肝菌为云南迪庆>云南红河>云南楚雄>云南普洱/曲靖>四川攀枝花>云南玉溪。然而,有关野生牛肝菌生长环境中 Cd 含量的研究未见报道,因此,野生牛肝菌中 Cd 含量的地域性分布差异与区域土壤、水体和大气等环境 Cd 污染的关系尚不明确。

1.2 野生牛肝菌 Hg 污染特征

野生牛肝菌对 Hg 的富集能力仅次于 Cd,美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐 5 种野生牛肝菌 Hg 的含量范围为 $0.02 \sim 22.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)^[4,11,19-20,23,25-26,28,30,37-39],最高 Hg 含量为国家标准($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 220 倍,具有潜在食品安全/人体健康风险。此外,5 种野生牛肝菌 Hg 含量表现出明显的种间差异和地域性差异,同种野生牛肝菌盖和柄对 Hg 的吸收积累效应也具有显著性差异。

不同品种的野生牛肝菌对 Hg 的富集效应差异显著,美味牛肝菌更易富集 Hg^[4]。5 种野生牛肝菌对 Hg 的富集能力表现为美味牛肝菌>绒柄牛肝菌>小美牛肝菌>灰褐牛肝菌>黄褐牛肝菌,Hg 含量分别为 $0.1 \sim 22.0$ 、 $0.02 \sim 13.0$ 、 $0.09 \sim 4.9$ 、 $0.1 \sim 3.2$ 和 $0.9 \sim 1.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高 Hg 含量分别为国家标准的 220 倍、130 倍、49 倍、30 倍和 19 倍^[4,11,19-20,23,25-26,28,30,37-39]。已报道的美味、灰褐和黄褐牛肝菌 Hg 含量全部超标,大部分绒柄牛肝菌和小美牛肝菌 Hg 含量超标。由表 2 可知,报道的 5 种野生牛肝菌 Hg 的超标率达 95% 以上。因此,应重视野生牛肝菌对 Hg 的富集机制及其食品安全/人体健康风险。

表 1 野生牛肝菌不同部位(菌盖、菌柄、子实体) Cd 的含量
Table 1 Cd concentration in different parts (cap, stipe, fruiting body) of wild *Boletus*

牛肝菌品种 <i>Boletus species</i>	Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Cd concentration/(mg·kg ⁻¹)			<i>Q</i> _{C/S}	产地 Origins	参考文献 References
	菌盖 Cap	菌柄 Stipe	子实体 Fruiting body			
美味牛肝菌 <i>B. edulis</i>	-	-	31.5 ~ 45.8	-	中国云南 Yunnan, China	[13]
	75.3	22.1	-	3.41	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[14]
	32.6	40.2	-	0.81	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[14]
	36.3	8.70	-	4.17	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[14]
	22.2	26.9	-	0.83	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[14]
	-	-	21.2	-	中国四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan, China	[15]
	11.8	4.99	-	2.36	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[14, 16]
	-	-	8.14 ~ 23.4	-	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[16]
	3.67 ~ 19.9	2.36 ~ 11.3	-	1.56 ~ 8.43	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[14, 18]
	-	-	2.77 ~ 11.5	-	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[17, 19]
	-	-	7.08 ~ 12.3	-	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[20]
	-	-	6.29 ~ 8.37	-	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[20]
	7.75	4.25	-	1.82	中国云南文山 Wenshan, Yunnan, China	[14]
	9.50、6.20	2.83、3.37	-	3.36、1.84	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[21]
	4.13、1.17	1.64、0.46	-	2.52、2.54	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
	-	-	0.07 ~ 4.10	-	中国云南 Yunnan, China	[22]
	2.11	0.90	-	2.34	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[21]
	1.93	1.73	-	1.12	克罗地亚 Croatia	[23]
	1.40 ~ 5.30	0.55 ~ 1.50	-	1.52 ~ 3.53	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	0.96	0.26	-	3.69	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[24]
绒柄牛肝菌 <i>B. tomentipes</i>	-	-	0.05 ~ 0.63	-	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[25]
	0.96	0.98	-	0.98	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
	-	-	7.41 ~ 20.5	-	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[16]
	1.40	3.20	-	0.43	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[22]
	4.70 ~ 7.17	3.72 ~ 4.49	-	1.26 ~ 1.59	中国云南红河 Honghe, Yunnan, China	[17]
	0.48 ~ 3.15	0.40 ~ 2.04	-	1.54 ~ 2.20	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[27]
	1.13	0.59	-	1.92	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	2.58	1.31	-	1.96	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[24]
	1.20	0.60	-	2.00	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[11, 27]
	0.67	0.51	-	1.31	中国四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan, China	[11]
	0.48 ~ 0.59	0.42 ~ 0.43	-	1.37、1.14	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[27]
	0.38 ~ 0.63	0.25 ~ 0.37	-	1.02 ~ 2.10	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[11, 27-28]
	0.36、0.46	0.37、0.31	-	0.97、1.48	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
小美牛肝菌 <i>B. speciosus</i>	-	-	0.16 ~ 0.32	-	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[27]
	-	-	0.18 ~ 0.23	-	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[27]
	3.62 ~ 24.9	1.53 ~ 8.92	-	2.36 ~ 2.79	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[17]
	-	-	3.96 ~ 11.9	-	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[16]
	-	-	0.03 ~ 2.04	-	中国云南 Yunnan, China	[22]
	-	-	0.07 ~ 0.81	-	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[25]

续表1

牛肝菌品种 <i>Boletus species</i>	Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Cd concentration/(mg·kg ⁻¹)			<i>Q</i> _{C/S}	产地 Origins	参考文献 References
	菌盖 Cap	菌柄 Stipe	子实体 Fruiting body			
	-	-	18.8 ~ 25.0	-	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[29]
	-	-	21.8	-	中国云南宣威 Xuanwei, Yunnan, China	[29]
	19.0	12.0		1.58	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
	14.5	7.55		1.92	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	-	-	11.9 ~ 15.8	-	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[29]
	20.9	10.4	-	2.01	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[21]
灰褐牛肝菌	-	-	10.4 ~ 18.0	-	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[29-30]
<i>B. griseus</i>	12.4、11.9	7.36、7.39	-	1.68、1.60	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
	-	-	10.8、12.0、20.5	-	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[29]
	-	-	11.0、13.0、18.9	-	中国云南红河 Honghe, Yunnan, China	[29]
	-	-	10.6、16.2	-	中国云南文山 Wenshan, Yunnan, China	[29]
	2.94	2.20	-	1.34	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[21]
	-	-	5.23、7.23、9.11	-	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[29]
	-	-	0.017 ~ 1.70	-	中国云南 Yunnan, China	[31]
黄褐牛肝菌	-	-	0.20 ~ 9.35	-	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[16]
<i>B. impolitus</i>						

注:盖和柄栏中-表示未拆分盖和柄,子实体栏中-表示已拆分为盖和柄;国家标准(GB 2762—2017)为 0.2 mg·kg⁻¹。
Notes: - represents that the cap and stipe were not separated in the “Cap” and “Stipe” columns, and were separated in the “Fruiting body” column; National Standards of China (GB 2762—2017) is 0.2 mg·kg⁻¹.

野生牛肝菌盖的 Hg 含量普遍高于柄。中国云南各地区美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐牛肝菌中 Hg 的 *Q*_{C/S} 值分别为 1.23 ~ 3.21、1 ~ 3.43、1.80 ~ 4.08、1 ~ 3.71 和 1.9 ~ 2.11(均>1),仅 5 份牛肝菌样品 Hg 的 *Q*_{C/S} 值<1,因此,~95%的野生牛肝菌样品 *Q*_{C/S} ≥ 1^[1,30,37-38]。中国四川西昌和克罗地亚的美味牛肝菌中 Hg 的 *Q*_{C/S} 值为 2.40 和 1.10^[23,26]。波兰黄褐牛肝菌盖和柄 Hg 含量分别为 0.83 ~ 3.40 mg·kg⁻¹ 和 0.38 ~ 1.20 mg·kg⁻¹, *Q*_{C/S} 值范围为 2.1 ~ 3.9^[39]。奥古斯托原始森林野生牛肝菌样品中,盖和柄的 Hg 含量分别为 0.059 ~ 0.61 mg·kg⁻¹ 和 0.024 ~ 0.16 mg·kg⁻¹,盖中的 Hg 含量均高于柄^[40]。以上研究表明野生牛肝菌对 Hg 的富集能力为盖>柄。然而,仍需进一步研究证实造成该现象的原因是由于牛肝菌菌丝吸收 Hg,而后将其转运到菌盖部位^[41-42],或野生牛肝菌盖中的 Hg 主要来源于大气沉降^[20,35]。

野生牛肝菌子实体中检出不同形态的 Hg。环境中常见的 Hg 形态包括甲基汞、乙基汞、苯基汞和无机汞 4 种,毒性大小为甲基汞>乙基汞>苯基汞>

无机汞^[37]。中国云南 5 个批次的野生牛肝菌样品均检出无机汞和甲基汞,含量范围分别为 3.02 ~ 3.71 mg·kg⁻¹ 和 0 ~ 0.089 mg·kg⁻¹,未检出乙基汞,认为牛肝菌中的 Hg 主要以无机汞的形式存在,含有少量甲基汞^[43]。但目前仍未见详细报道分析美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐等野生牛肝菌中不同形态 Hg 的含量,这不利于科学评估野生牛肝菌中 Hg 的食品安全/人体健康风险。

此外,由表 2 可知不同产地来源的野生牛肝菌对 Hg 元素的富集效应表现出明显的地域性差异。中国地区绒柄牛肝菌中 Hg 含量大小顺序为云南楚雄/玉溪>云南红河>云南普洱/大理>四川攀枝花>云南迪庆>云南保山;美味牛肝菌为中国云南玉溪>中国云南保山/迪庆>中国云南昆明/文山>中国云南楚雄>中国云南普洱/大理>克罗地亚>中国四川西昌;小美牛肝菌为云南玉溪/楚雄>云南曲靖>云南保山>云南昆明,但灰褐牛肝菌和黄褐牛肝菌中 Hg 含量的地域性差异相对不显著,这可能是由于区域环境中 Hg 的含量较低,也可能与二者对 Hg 的富集效应不显著有关。

表 2 野生牛肝菌不同部位(菌盖、菌柄、子实体) Hg 的含量
Table 2 Hg concentration in different parts (cap, stipe, fruiting body) of wild *Boletus*

Hg 含量/(mg·kg ⁻¹)						
牛肝菌品种	Hg concentration/(mg·kg ⁻¹)			Q _{CS}	产地	参考文献
<i>Boletus</i> species	菌盖	菌柄	子实体		Origins	References
	Cap	Stipe	Fruiting body			
美味牛肝菌 <i>B. edulis</i>	3.60 ~ 22.0	1.30 ~ 8.40	—	2.04 ~ 3.21	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[37]
	15.0	8.20	—	1.82	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[37]
	—	—	8.20 ~ 15.0	—	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[20]
	16.0、1.30	6.10、1.60	—	2.62、1.23	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[37]
	—	—	0.96 ~ 16.0	—	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[19]
	2.10 ~ 13.0	1.30 ~ 6.90	—	1.61 ~ 2.66	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[37]
	11.0	4.50	—	2.44	中国云南文山 Wenshan, Yunnan, China	[37]
	7.30、5.30	3.90、2.40	—	1.87、2.20	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[37]
	3.50	4.40	—	0.79	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[37]
	4.40、2.70	1.90、0.90	—	2.31、3.00	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[4,20]
	—	—	0.40 ~ 2.70	—		
	2.56	2.35	—	1.08	克罗地亚 Croatia	[23]
	—	—	0.42 ~ 1.30	—	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[25]
	0.38	0.16	—	2.37	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
	—	—	0.62±0.06 (<i>n</i> =47)	—	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[4]
	—	—	0.66±0.21 (<i>n</i> =4)	—	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[4]
	—	—	0.39±0.04 (<i>n</i> =37)	—	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[4]
	—	—	0.15±0.05 (<i>n</i> =4)	—	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[4]
	—	—	0.10±0.04 (<i>n</i> =3)	—	中国云南红河 Honghe, Yunnan, China	[4]
绒柄牛肝菌 <i>B. tomentipes</i>	3.90 ~ 13.0	3.10 ~ 6.60	—	1.25 ~ 2.09	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[37]
	1.70 ~ 12.0	2.90 ~ 4.30	—	0.58、1.19 ~ 3.43	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[11,37]
	5.40、3.70	2.80、2.30	—	1.92、1.60	中国云南红河 Honghe, Yunnan, China	[37]
	0.60	1.20	—	0.50	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[37]
	0.50	0.60	—	0.83	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[37]
	0.29	0.17	—	1.71	中国四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan, China	[11]
	0.13、0.10	0.20、0.20	—	1.30、1.00	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[11,37]
	—	—	0.04	—	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[28]
小美牛肝菌 <i>B. speciosus</i>	0.90 ~ 4.80	0.80 ~ 1.50	—	1.13 ~ 3.20	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[37–38]
	4.90	1.20	—	4.08	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[37]
	3.90、2.10	1.70、1.00	—	2.29、2.10	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[37]
	2.70	1.50	—	1.80	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[37]
	1.80	0.80	—	2.25		[37]
	—	—	0.09 ~ 0.42	—	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[25]
灰褐牛肝菌 <i>B. griseus</i>	3.00	2.90	—	1.03	中国云南保山 Baoshan, Yunnan, China	[37]
	0.90	3.20	—	0.28	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[37]
	2.60	0.70	—	3.71	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[37]
	2.20	2.20	—	1.00	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[37]
	1.40、1.90	0.80、0.60	—	1.75、3.16	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[37]
	0.66 ~ 1.30	0.38 ~ 0.60	—	1.80 ~ 2.16	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[30,37–38]
	1.20	0.60	—	2.00	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[37]
	—	—	0.10	—	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
黄褐牛肝菌 <i>B. impolitus</i>	1.90	0.90	—	2.11	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[37]
	1.90	1.00	—	1.90	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[37]
	0.83 ~ 3.4	0.38 ~ 1.20	—	2.18 ~ 2.83	波兰 Poland	[39]

注:盖和柄栏中—表示未拆分盖和柄,子实体栏中—表示已拆分为盖和柄;国家标准(GB 2762—2017)为 0.1 mg·kg⁻¹。
Notes: — represents that the cap and stipe were not separated in the “Cap” and “Stipe” columns, and were separated in the “Fruiting body” column; National Standards of China (GB 2762—2017) is 0.1 mg·kg⁻¹.

1.3 野生牛肝菌 As 污染特征

美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐 5 种野生牛肝菌中均检出 As 元素,含量范围为 0.01 ~ 18.8 mg·kg⁻¹[11,19,21,23,25,27-28,30,44](表 3),部分含量超出《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[32]规定的食用菌及其制品中 As 的标准限值(0.5 mg·kg⁻¹),最高超过标准 37 倍。此外,野生牛肝菌中检出 As 的多种形态,且 As 含量存在显著的个体和地域性分布差异,同一个体不同部位(盖和柄)的 As 含量也存在差异,但无显著性规律。

野生牛肝菌中 As 含量的个体差异表现为调查的 5 种野生牛肝菌 As 含量大小顺序为绒柄牛肝菌>美味牛肝菌>黄褐/灰褐牛肝菌>小美牛肝菌,含量分别为 0.03 ~ 18.8、0.028 ~ 7.02、0.18 ~ 4.24、0.21 ~ 1.73 和 0.04 ~ 0.26 mg·kg⁻¹[11,19,21,23,25,27-28,30,44],绒柄牛肝菌中 As 含量的报道^[11,27-28,44]最多,含量>0.5 mg·kg⁻¹,多数含量在 1.00 ~ 19.0 mg·kg⁻¹之间,超过标准 2 倍~40 倍。美味牛肝菌中 As 含量为 0.3 ~ 7.02 mg·kg⁻¹[19,21,25,44],超过国家标准的占比较大,食品安全/人体健康风险值得关注。已报道的中国云南昆

表 3 野生牛肝菌不同部位(菌盖、菌柄、子实体) As 的含量
Table 3 As concentration in different parts (cap, stipe, fruiting body) of wild *Boletus*

牛肝菌品种 <i>Boletus species</i>	As 含量/(mg·kg ⁻¹) As concentration/(mg·kg ⁻¹)			<i>Q</i> _{CS}	产地 Origins	参考文献 References
	菌盖 Cap	菌柄 Stipe	子实体 Fruiting body			
美味牛肝菌 <i>B. edulis</i>	7.02	0.92	—	7.63	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[24]
	—	—	5.38	—	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[19]
	ND ~ 2.50	ND ~ 5.81	—	0.22 ~ 2.62	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[44]
	0.05 ~ 1.79	ND ~ 1.16	—	1.11	中国云南昆明、玉溪、楚雄 Kunming, Yuxi and Chuxiong, Yunnan, China	[21,44]
	0.68、0.95	1.33、0.88	—	0.51、1.07	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[21]
绒柄牛肝菌 <i>B. tomentipes</i>	8.12 ~ 17.4	10.5 ~ 18.8	—	0.77 ~ 0.93	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[44]
	10.8、4.87	13.4、3.96	—	0.81、1.23	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[21]
	4.87、10.8	3.96、13.4	—	1.23、0.81	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[27]
	0.04 ~ 10.3	0.37 ~ 6.35	—	0.11 ~ 1.62	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[44]
	2.35 ~ 6.42	1.77 ~ 9.02	—	0.58 ~ 0.69	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[44]
	3.49	5.65	—	0.62	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[27]
	2.30	1.90	—	1.21	中国四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan, China	[11]
	1.54 ~ 1.96	0.96 ~ 3.37	—	0.46 ~ 2.04	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21,27]
	0.19 ~ 7.58	0.03 ~ 9.82	—	0.46 ~ 2.04	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[44]
	1.01、2.24	1.21、1.97	—	0.83、1.14	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
小美牛肝菌 <i>B. speciosus</i>	0.01 ~ 5.20	0.16 ~ 4.24	—	0.06 ~ 1.24	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[11,27,44]
	—	—	0.10 ~ 0.24	—	中国云南玉溪、楚雄 Yuxi and Chuxiong, Yunnan, China	[28]
	0.04 ~ 0.26	—	—	—	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[25]
灰褐牛肝菌 <i>B. griseus</i>	0.21 ~ 0.75	0.14 ~ 1.73	—	0.43 ~ 1.50	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[21,30,44]
黄褐牛肝菌 <i>B. impolitus</i>	0.26 ~ 0.55	0.30 ~ 0.56	—	0.48 ~ 1.83	中国云南普洱、玉溪 Puer and Yuxi, Yunnan, China	[21,23]
	0.52	0.50	—	1.04	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	0.18 ~ 1.18	0.42 ~ 4.24	—	0.28 ~ 0.42	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[44]

注:盖和柄栏中—表示未拆分盖和柄,子实体栏中—表示已拆分为盖和柄;国家标准(GB 2762—2017)为 0.5 mg·kg⁻¹。
Notes: — represents that the cap and stipe were not separated in the “Cap” and “Stipe” columns, and were separated in the “Fruiting body” column; National Standards of China (GB 2762—2017) is 0.5 mg·kg⁻¹.

明、普洱、玉溪和楚雄等地的灰褐牛肝菌盖和柄的As含量接近或略高于国家标准限值,而小美和黄褐牛肝菌中As含量的报道较少。因此,5种野生牛肝菌品种中,绒柄和美味牛肝菌较容易吸收并积累As元素,但详细的积累机制未见报道。

野生牛肝菌盖和柄中As含量存在差异,表现为盖含量高于或低于柄,即 $Q_{CS}>1$ 或 <1 ,但与Cd和Hg元素相比,As元素在牛肝菌盖和柄中的含量差异无显著规律。中国云南灰褐、美味和绒柄牛肝菌中As含量的 Q_{CS} 值分别为0.43~1.83、0.22~7.63和0.11~2.04^[11,21,24,27,30,44]。中国四川攀枝花绒柄牛肝菌As含量的 Q_{CS} 值为1.21^[11],~51%的野生牛肝菌As含量盖>柄,其余牛肝菌As含量为盖<柄^[21],表明盖和柄对As的富集效应差异并无显著规律。

野生菌子实体中As主要以无机和有机形态存在。环境中的As形态主要包括无机砷:亚砷酸盐As(III)和砷酸盐As(V);有机砷化合物:一甲基砷酸(MMA)、二甲基砷酸(DMA)、砷胆碱(AsC)和砷甜菜碱(AsB);砷-硫化物及某些不明化合物^[45]。由于不同形态As的毒性强弱差异显著,一般认为无机砷的毒性大,有机砷的毒性较小或无毒,如As(III)的毒性大于As(V),MMA和DMA毒性较低,而AsB和AsC几乎无毒^[46]。因此,有必要关注野生牛肝菌中不同形态As的含量。重庆野生牛肝菌中DMA占比~39.3%,且以有机砷形态为主^[47]。然而,Koch等^[48]研究发现,加拿大As污染地区采集的野生牛肝菌中存在大量无机砷。表明野生菌中的As形态受地理条件、土壤性质等环境因素影响。同样地,不同形态As在各牛肝菌中的含量信息仍较少,不利于野生菌产业发展与推广。此外,准确掌握野生菌中重金属的赋存形态对探究野生菌对重金属的吸收积累机制意义重大。

由表3可知,中国地区美味、绒柄、小美、灰褐和黄褐5种野生牛肝菌As含量亦具有地域性差异,但这种差异性仅在容易富集As元素的绒柄牛肝菌中表现突出,其As含量大小顺序为云南普洱>云南曲靖>四川攀枝花>云南楚雄>云南玉溪,这可能与区域土壤及环境介质中的As含量差异有关,但前期研究尚未关注区域水体、大气及土壤基质中As的含量,因此无法判断造成绒柄牛肝菌富集大量As且表现出地域性差异的具体原因。

1.4 野生牛肝菌Pb污染特征

相比Cd和Hg,野生牛肝菌对Pb的累积效应

并不显著,Pb含量普遍在0.02~4.46 mg·kg⁻¹之间,为国家标准限值(1.0 mg·kg⁻¹)的0.02倍~4.46倍^[11,19,21~26,28~30](表4)。但马培等^[26]在中国四川西昌地区的灰褐牛肝菌盖和柄中检出Pb含量相对较高,分别为9.3 mg·kg⁻¹和5.2 mg·kg⁻¹,Liu等^[19]检出云南大理的美味牛肝菌中Pb含量为5.63 mg·kg⁻¹,这可能与区域环境中的Pb含量有关。与野生牛肝菌盖和柄对As元素的积累情况类似,野生牛肝菌盖和柄对Pb的富集效应差异也无显著性规律,且含量在个体和地域上的分布规律同样不显著。

野生牛肝菌盖和柄的Pb含量存在差异,但无显著规律。云南玉溪灰褐、美味和绒柄3种牛肝菌中Pb含量的 Q_{CS} 值范围为0.04~1.42、0.23~3.37和0.3~1.78, $Q_{CS}>1$ 或 $Q_{CS}<1$ ^[11,21,23~24]。克罗地亚和中国四川西昌美味牛肝菌中Pb含量的 Q_{CS} 值为1.43、1.8(>1),但四川西昌灰褐牛肝菌及攀枝花绒柄牛肝菌中Pb含量的 Q_{CS} 分别为0.6、0.3(<1)^[23,26]。因此,野生牛肝菌盖和柄对Pb的富集效应差异并无显著性规律,这可能与牛肝菌不容易富集Pb元素有关。

目前有关野生牛肝菌中Pb含量的报道主要集中在灰褐牛肝菌和美味牛肝菌,2种牛肝菌中Pb含量范围分别为0.17~9.30 mg·kg⁻¹和0.02~5.63 mg·kg⁻¹^[11,19,21~26,28],云南楚雄和玉溪的绒柄牛肝菌中Pb含量范围为0.45~3.38 mg·kg⁻¹^[28],云南昆明小美牛肝菌Pb含量范围为0.11~0.42 mg·kg⁻¹^[22,25],暂未见黄褐牛肝菌中Pb含量的相关报道。相比小美牛肝菌,灰褐、美味和绒柄3种牛肝菌是较容易吸收Pb元素的牛肝菌品种。与Cd、Hg和As元素相比,野生牛肝菌对Pb的富集效应较低,但部分含量高出国家标准的1倍~4倍,从饮食安全角度出发,仍应关注其食品安全/人体健康风险。

2 野生菌重金属的食品安全与人体健康风险评价 (Food safety and human health risk assessment of heavy metals in wild *Boletus*)

2.1 野生菌食品安全标准

目前,可参考的食用菌重金属的限量标准主要有《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)、《产品质量监督抽查实施规范食用菌》(CCGF108.3—2010)和《无公害食品食用菌》(NY 5095—2006)等^[32,49]。相比而言,《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)对重金属的

限量要求更为严格、颁布实施年限较近,具体限量值如表 5 所示。此外,联合国粮农组织和世界卫生组织(FAO/WHO)规定,人体对 Cd、Hg、As 和 Pb 每周允许摄入限值 (provisional tolerable weekly intake, PTWI)分别为 0.007、0.005、0.015 和 0.025 mg·kg⁻¹,据此,体质量为 65 kg 的成人每周可容忍的 Cd、Hg、As 和 Pb 的摄入量为 0.455、0.325、0.975 和 1.625 mg^[9,50]。根据以上标准,可初步评估野生牛肝菌中重金属的食品安全/人体健康风险,并据此提出相应的食用建议。

值得注意的是,研究者已报道野生菌中不同形态的 Hg 和 As,但我国《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)仅针对食用菌及其制品中总 As 和总 Hg 做了明确的界定,这可能不利于精确评价野生菌及其制品中 As 和 Hg 的食品安全/人体健康风险,进而影响野生食用菌的产业发展、出口贸易和安全饮食等。因此,建议今后研究可重点关注野生食用菌中各形态重金属的含量及相应的食用风险,进而为食品行业标准的制定与执行提供基础数据和理论依据。

表 4 野生牛肝菌不同部位(菌盖、菌柄、子实体) Pb 的含量
Table 4 Pb concentration in different parts (cap, stipe, fruiting body) of wild *Boletus*

牛肝菌品种 <i>Boletus</i> species	Pb 含量/(mg·kg ⁻¹) Pb concentration/(mg·kg ⁻¹)			<i>Q</i> _{CS}	产地 Origins	参考文献 References
	菌盖 Cap	菌柄 Stipe	子实体 Fruiting body			
美味牛肝菌 <i>B. edulis</i>	—	—	5.63	—	中国云南大理 Dali, Yunnan, China	[19]
	4.42、1.79	1.31、1.79	—	0.35 ~ 3.37	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
	4.16	2.47	—	1.68	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[21]
	2.40	1.40	—	1.71	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
	0.84 ~ 2.06	1.11 ~ 1.57	—	0.64 ~ 1.20	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	1.44、0.97	2.04、2.75	—	0.51、1.08	中国云南曲靖 Qujing, Yunnan, China	[21]
	1.42	0.99	—	1.43	克罗地亚 Croatia	[23]
	—	—	0.19 ~ 1.42	—	中国云南 Yunnan, China	[22]
	0.15	0.65	—	0.23	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[24]
	—	—	0.02 ~ 1.10	—	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[25]
绒柄牛肝菌 <i>B. tomentipes</i>	—	—	1.64 ~ 3.88	—	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[28]
	—	—	1.38 ~ 3.22	—	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[28]
	1.02、1.34	2.71、1.09	—	0.38、1.23	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
	1.45	1.50	—	0.97	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	1.39、1.90	0.78、1.43	—	1.78、1.33	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[21]
	0.96	3.20	—	0.30	中国四川攀枝花 Panzhihua, Sichuan, China	[11]
	0.58、0.67	1.10、1.00	—	0.38 ~ 1.78	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[11]
	0.16	0.15	—	1.07	中国云南迪庆 Diqing, Yunnan, China	[11]
小美牛肝菌 <i>B. speciosus</i>	—	—	0.19 ~ 0.75	—	中国云南 Yunnan, China	[22]
	—	—	0.11 ~ 0.42	—	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[25]
灰褐牛肝菌 <i>B. griseus</i>	5.20	9.30	—	0.56	中国四川西昌 Xichang, Sichuan, China	[26]
	2.18、0.80	1.54、1.36	—	0.59、1.42	中国云南玉溪 Yuxi, Yunnan, China	[21]
	1.12	6.45	—	0.17	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[21]
	0.21、0.11	4.46、2.46	—	0.05、0.04	中国云南普洱 Puer, Yunnan, China	[24]
	—	—	1.01 ~ 1.24、0.65	—	中国云南昆明 Kunming, Yunnan, China	[29–30]
	0.84	1.82	—	0.46	中国云南楚雄 Chuxiong, Yunnan, China	[21]
	—	—	0.17 ~ 1.46	—	中国云南 Yunnan, China	[22,29]

注:盖和柄栏中—表示未拆分盖和柄,子实体栏中—表示已拆分为盖和柄;国家标准(GB 2762—2017)为 0.1 mg·kg⁻¹。
Notes: — represents that the cap and stipe were not separated in the “Cap” and “Stipe” columns, and were separated in the “Fruiting body” column; National Standards of China (GB 2762—2017) is 0.1 mg·kg⁻¹.

表 5 食用菌及其制品中重金属的标准限量 (GB 2762—2017)
Table 5 Standard limit values of heavy metals in edible mushrooms and their 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 (exclude <i>Shiitake</i> mushroom and <i>Agaricus blazei</i> Murrill)	总 As Total As	0.5
	总 Hg Total Hg	0.1
	Pb	1.0
	Cd	0.2

2.2 食品安全风险评价方法

国内外有关食品中污染物的安全风险评价标准和方法较多。目前,主要以单因子污染指数法(single factor pollution index method, P_i)评价食品中单项重金属的污染水平,并以 P_i 值划分风险等级, $P_i \leq 0.6$ (一级),表明存在污染物,含量接近或略高于背景值; $P_i = 0.6 \sim 1.0$ (二级),表明有较多污染物残留; $P_i \geq 1.0$ (三级),表明污染物的含量超过限量标准,具有潜在食品安全风险。以内梅罗综合因子污染指数法(comprehensive factor pollution index method, P)评价某一元素对多个主体的总污染情况^[21],或以 P 评价多个污染元素存在时的总污染水平^[51],评价标准为 $P < 1$ (I),非污染; $1 < P \leq 2$ (II),轻度污染; $2 < P \leq 3$ (III),中度污染; $3 < P \leq 5$ (IV),严重污染; $P > 5$ (V),重度污染^[52]。生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)则是指作物中元素含量与生长土壤中该元素含量的比值,反映了作物与表层土壤中某元素富集或转移水平的相关性^[53],也被用于评估野生菌中重金属污染物的食品安全风险。BCF < 1,表示该作物积累给定元素的潜力较低,或基质中所含元素的生物利用度较低;BCF > 1 表示作物对目标金属元素具有生物累积效应^[54]。表 6 详细介绍了 P_i 、 P 、BCF 的定义、公式、评价结果、优缺点、适用条件及其在野生牛肝菌重金属的风险评价应用等信息。

2.3 人体健康风险评价方法

化学污染物的毒害作用与其进入人体的绝对量有关。因此,评价某种物质的人体健康风险应以人群对某化学污染物的实际摄入量与该污染物的安全摄入量进行比较^[55]。目前,日均摄入量评估(estimated daily intake, EDI)、靶标危害商数法(target hazard quotient, THQ)、食品安全指数法(international food standard, IFS)及 PTWI 是国内外评估野生菌中污染物的人体健康风险的常用方法(表 7)。EDI 值与食物中重金属含量及对该食物的食用量有关^[56]。

THQ 是一种用于评估人体通过食物摄取重金属而引发健康风险的评估方法。该方法假定污染物吸收剂量等于摄取剂量,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。THQ < 1,表明对暴露人群无显著健康风险,THQ > 1,则存在健康风险,且 THQ 数值越大,风险越高^[49]。IFS 是评价野生菌中某重金属残留对消费者是否存在危害以及危害程度的方法之一。判定标准:IFS < 1,无显著人体健康风险;IFS ≤ 1,风险可接受;IFS > 1,风险超过可接受限度^[5,57]。PTWI 被用作评估从食物中摄入有毒金属引发人体健康风险的参考值,即一周内可接受的有毒金属摄入量^[40]。EDI、THQ、IFS 和 PTWI 在野生菌重金属的人体健康风险研究具有重要意义,其中,THQ 和 PTWI 在食品重金属的人体健康风险评价中应用最广。

2.4 生物有效性评价进展

目前,EDI、IFS、THQ 和 PTWI 等评价方法普遍通过估计的暴露量和推荐剂量来评估野生菌子实体中重金属经口食摄入量的潜在人体健康风险,而实际被人体吸收的有效量尚不明确,因此,基于重金属全量的评价方法认为污染物进入人体后能够被 100% 的吸收,可能会高估风险^[58]。近年来,生物有效性被广泛运用于食品重金属的人体健康风险评价。其定义是指经口摄入的污染物全量中能够通过胃、肠道并最终进入体循环的比例^[49]。生物有效性可准确反映食品中重金属被人体吸收的有效量,在评估污染物的人体健康风险方面可避免以全量为标准带来的评价偏差,对食品中重金属的人体健康风险评价具有重要意义和应用价值,已被广泛应用于粮食、蔬菜、水果、肉类和海产品等的人体健康风险评估中^[59-61]。

体外胃肠液模拟法和体内动物模型活体实验是生物有效性的主要测定方法。其中,体外胃肠模拟法常用的有 SBRC(Solubility Bioavailability Research Consortium)、IVG(In Vitro Gastrointestinal)、PBET

表 6 野生牛肝菌重金属的食品安全风险评价
Table 6 Food safety risk assessment methods for heavy metals in wild *Boletus*

方法 Method	定义 Definition	公式 Formula	评价等级划分 Evaluation grade	优/缺点 Advantages/disadvantages	适用条件 Application condition	野生牛肝菌评价应用 Evaluation and application in wild <i>Boletus</i>
单因子污染指数法(P_i) Single factor pollution index method (P_i)	作物中单项重金属的污染水平 Pollution level of single heavy metals in crops	$P_i = \frac{C_i}{S_i}$ P_i : 作物中重金属污染指数 Pollution index of heavy metals in crops C_i : 作物中第 i 种重金属实测含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Measured concentration of heavy metal (i) in crops ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) S_i : 作物中第 i 种重金属限量标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Standard limit values of heavy metal (i) in crops ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	(1) $P_i \leq 0.6$ (一级) 污染物残留, 含量接近或略高于背景值 $P_i \leq 0.6$ (Lever 1) Contaminants residual, with levels close to or slightly exceed background values (2) $0.6 < P_i \leq 1.0$ (二级) 污染物残留较多 $0.6 < P_i \leq 1.0$ (Lever 2) Much pollutants residual (3) $P_i > 1.0$ (三级) 污染物含量超过标准限值, 食用产生潜在危害 ^[5] $P_i > 1.0$ (Lever 3) The contaminant content exceeds the standard limit with potential risk ^[5]	优点: 直观反映特征污染因子 Advantage: Direct reflect characteristics of pollution factors 缺点: 难以反映总体污染状况 ^[5] Disadvantage: Difficult to reflect the overall pollution level ^[5]	适用于存在单一或较少污染物, 或某一种污染物较突出的情况 Suitable to single or little pollutants, or a particular pollutant	(1) 中国云南楚雄野生牛肝菌 Hg、As、Cd 和 Pb 的 P_i 为 3.34、1.34、0.58 和 0.09, 表明其食品安全风险高低顺序为 $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb}$ ^[5] P_i values of Hg, As, Cd and Pb were 3.34, 1.34, 0.58 and 0.09 in wild <i>Boletus</i> from Chuxiong, Yunnan, China, and the food safety risk is $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb}$ ^[5] (2) 中国云南 26 个野生牛肝菌盖、柄 As 的 P_i 分别为 0.35 ~ 26.7、0.12 ~ 34.2, 且多数牛肝菌 P_i (As) > 1 , 表明多数牛肝菌处于 As 重度污染水平 ^[44] P_i value of As in wild <i>Boletus</i> cap and stipe from Yunnan, China were 0.35 ~ 26.7 and 0.12 ~ 34.2 with most of the <i>Boletus</i> P_i (As) > 1 , indicating severe pollution by As ^[44]
内梅罗综合因子污染指数法(P) Comprehensive factor pollution index method (P)	总重金属的污染水平或某重金属的总体污染水平 Pollution level of total heavy metal or the overall pollution level of single heavy metals	$\frac{P_1^2 + P_{\max}^2}{2}$ P_1 : 各项污染指数均值 Mean values of each pollution index $P_{\max}$: 最大污染指数 Maximum pollution index	(1) $P < 1$ (I) 非污染 No pollution (2) $1 < P \leq 2$ (II) 轻度污染 Light pollution (3) $2 < P \leq 3$ (III) 中度污染 Moderate pollution (4) $3 < P \leq 5$ (IV) 严重污染 Serious pollution (5) $P > 5$ (V) 重度污染 ^[52] Heavy pollution ^[52]	优点 Advantages: (1) 考虑各种污染因子在污染评价中所占权重 The weight of various pollution factors are involved during pollution assessment (2) 能客观反映总体污染状况与污染程度 Objectively reflect the overall pollution status and pollution level 缺点: 难以反映特征污染因子 Disadvantage: Difficult to reflect characteristics of pollution factors	适用于综合评价多种污染物引起的总体污染水平, 或某元素对多个评价主体的总体污染情况 Suitable to evaluate the overall pollution level caused by various pollutants, or the overall pollution level of a certain element to multiple evaluation subjects	云南灰褐牛肝菌盖和柄的 $\text{As} \cdot P_{\text{sum}}$ 为 1.86 和 2.56, 内梅罗综合污染指数 P 相对较低, 属于轻度污染; 灰褐牛肝菌盖和柄的 $\text{Cd} \cdot P_{\text{sum}}$ 值较高, 为 55.1、28.2, 属于 Cd 严重污染食品 ^[21] $\text{As} \cdot P_{\text{sum}}$ of <i>B. griseus</i> cap and stipe from Yunnan, China were 1.86 and 2.56, and composite pollution index (P) was relatively low, indicating light pollution; the $\text{Cd} \cdot P_{\text{sum}}$ values of cap and stipe were 55.1 and 28.2, indicating serious pollution of Cd ^[21]

续表6

方法 Method	定义 Definition	公式 Formula	评价等级划分 Evaluation grade	优/缺点 Advantages/disadvantages	适用条件 Application condition	野生牛肝菌评价应用 Evaluation and application in wild <i>Boletus</i>
生物富集系数 (BCF)	作物中重金属元素含量与表层土壤/基质中该元素含量的比值	$BCF = \frac{C_m}{C_s}$ C_m: 作物中的某金属元素含量($mg \cdot kg^{-1}$)	(1)BCF<1 作物积累给定元素的潜力较低,或基质中所含元素的生物利用度较低	优点:反映作物对土壤中重金属的富集能力及元素的迁移难易程度 ^[18] Advantage: It reflects the ability of crops to enrich heavy metals in soil and the difficulty of element migration ^[18]	适用于作物从生长土壤或基质捕获污染物的情况	(1)中国四川 5 种野生牛肝菌 Cd、Pb、Hg 的 BCF 值范围为 1 ~ 79.2, 0.01 ~ 0.18 和 0.1 ~ 0.38; 其中, Cd 的 BCF>1, 盖、柄最高 BCF 值为 79.2 和 50, 表明野生牛肝菌富集 Cd 的能力强于 Pb 和 Hg, Cd 的食品安全风险较高 ^[26]
Bioconcentration factor (BCF)	The ratio of heavy metals concentration in crops to surface soil/substrate	$BCF = \frac{C_m}{C_s}$ Heavy metals concentration in crops ($mg \cdot kg^{-1}$) C_s: 土壤或基质中某金属元素含量($mg \cdot kg^{-1}$) Concentration of a metal in soil/substrate ($mg \cdot kg^{-1}$)	Crops have a limit ability to accumulate a given element, or low element bioavailability in substrates	缺点 Disadvantages: (1) 当存在多个污染元素时, 无法准确判断总体积累情况 The overall accumulation cannot be accurately judged when presenting multiple polluting elements (2) 数据不够直观, 风险等级划分也较为粗略 Data are not intuitive and the risk levels are sketchy	Suitable to crops that can uptake contaminant from soil or substrate	from Sichuan, China were 1 ~ 79.2, 0.01 ~ 0.18 and 0.1 ~ 0.38 with $BCF_{Cd} > 1$; the highest BCF values of cap and stipe were 79.2 and 50, indicating that <i>Boletus</i> prefers to accumulate Cd than Pb and Hg, thus Cd has a higher food safety risk ^[26]
			(2)BCF>1 作物对目标金属元素具有生物累积效应 ^[56] Crops can bioaccumulate target metals ^[56]			BCF values of Cd, Pb and Hg of five wild <i>Boletus</i> from Sichuan, China were 1 ~ 79.2, 0.01 ~ 0.18 and 0.1 ~ 0.38 with $BCF_{Cd} > 1$; the highest BCF values of cap and stipe were 79.2 and 50, indicating that <i>Boletus</i> prefers to accumulate Cd than Pb and Hg, thus Cd has a higher food safety risk ^[26]
						(2)中国云南迪庆美味牛肝菌 Cd、As 和 Pb 的 BCF 为 15.39, 1.01 和 0.23, 表明美味牛肝菌对 Cd 的富集能力最强, 其次是 As, 且不易吸收和富集 Pb 元素, 食品安全风险大小顺序为 $Cd > As > Pb$ ^[19]
						BCF values of Cd, As and Pb of <i>B. edulis</i> from Yunnan Diqing, China were 15.39, 1.01 and 0.23, indicating <i>B. edulis</i> prefers to accumulate Cd than As and Pb, with food safety risk in the order of $Cd > As > Pb$ ^[19]
						(3)中国云南小美牛肝菌 Cd 和 Pb 的 BCF 为 0.52, 0.02, 灰褐牛肝菌 Cd 和 Pb 的 BCF 为 6.4, 0.01, 表明小美牛肝菌对 Cd 和 Pb 无特异性富集能力, 而灰褐牛肝菌对 Cd 的富集能力较强, 对 Pb 无富集效应 ^[22]
						BCF values of Cd and Pb for <i>B. speciosus</i> and <i>B. griseus</i> were 0.52, 0.02 and 6.4, 0.01, indicating <i>B. speciosus</i> has low accumulation of Cd and Pb, while <i>B. griseus</i> has high accumulation of Cd ^[22]

表 7 野生牛肝菌重金属的人体健康风险评估

Table 7 Human health risk assessment methods for heavy metals in wild *Boletus*

方法 Method	定义 Definition	公式 Formula	评价等级划分 Evaluation grade	优缺点 Advantages/disadvantages	野生牛肝菌评价应用 Evaluation and application in wild <i>Boletus</i>
日均摄入量评 估(EDI) Estimated daily intake (EDI)	人均每日因食用 某食品摄入相应 重金属元素的量 Average daily in- take of heavy met- als from certain foods	$EDI = \frac{C_M \times D_{FI}}{B_{AW}}$ C_M : 食品中重金属的含量(mg· kg ⁻¹) Food heavy metals concentration (mg·kg ⁻¹) D_{FI} : 食品的日常消耗量(kg·d ⁻¹) Food daily consumption (kg· d ⁻¹) B_{AW} : 人的平均体重(kg) People average weight (kg)	根据 FAO/WHO 规定的 Cd、 Hg、As 和 Pb 临时可耐受每日 摄入量(provisional tolerable dai- ly intakes, PTDI)判断是否存在 人体健康风险 ^[9,50] Human health risk assessment based on provisional tolerable daily intakes (PTDI) of Cd, Hg, As, and Pb established by FAO/ WHO ^[9,50]	优点: 直观反映污染物的潜在 风险 Advantage: Direct reflect the po- tential risk of pollutants 缺点 Disadvantages: (1) 对比重金属全量与摄入限 量, 无法真实反映人体的有效 吸收量 Comparison between total and intake amount cannot reflect the absorption amount by human body (2) 未考虑其他摄入, 可能低估 风险 Did not include other ingestions, leading to underestimated risk	(1) 尼日利亚三角洲地区食用菌中 Cd 的成人、青少年和儿 童的 EDI 值分别为 0.001 ~ 0.004、0.001 ~ 0.005 和 0.001 ~ 0.011 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ , 与 PTDI(0.025 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)相比, 处于 安全水平 ^[53] Adults and children EDI of Cd were 0.001 ~ 0.004, 0.001 ~ 0.005 and 0.001 ~ 0.011 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ respectively in wild mushroom in the delta region of Nigeria, which were at a safe level compared with PTDI (0.025 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) ^[53] (2) 中国云南野生牛肝菌中 Cd 的成人和儿童 EDI 为 7.42 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ 和 6.98 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ ; Pb 的成人和儿童 EDI 为 0.43 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ 和 0.40 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ , 超过 FAO/WHO 规 定, 具有人体健康风险, 其中 Cd 的风险高于 Pb ^[13] Adults and children EDI of Cd and Pb were 7.42 mg·kg ⁻¹ · d ⁻¹ and 6.98 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ , 0.43 mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹ and 0.40 mg· kg ⁻¹ ·d ⁻¹ of wild <i>Boletus</i> from Yunnan, China, which exceed the FAO/WHO regulations and have potential human health risk (Cd>Pb) ^[13]
食品安全指数 法(IFS) International food standard (IFS)	膳食暴露下, 某种 化学污染物对人体 健康的危害程度 The extent to which a chemical contam- inant is harmful to human health thro- ugh dietary expo- sure	$IFS_c = \frac{EDI_c \times f}{SI_c \times b_w}$ EDI _c : 重金属 C 的实际摄入量 量估算值(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) Estimated actual daily intake of heavy metal (C) (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) f : 校正因子 Correction factor SI _c : 安全摄入量(mg·d ⁻¹) Safe intake amount (mg·d ⁻¹) b_w : 体重(kg) Weight (kg)	(1) IFS < 1, 无显著影响 IFS < 1, no significant effect on human health (2) IFS ≤ 1, 可接受的影响 IFS ≤ 1, acceptable effects (3) IFS > 1, 超过可接受限度 ^[5,57] IFS > 1, effects exceeding the ac- ceptable limits ^[5,57]	优点: 数据直观, 清晰反映污染 物的食用风险等级 Advantage: The data are intuitive and clearly reflect the edible risk levels 缺点: 采用重金属全量进行风 险评估, 可能存在评价偏差 Disadvantage: Risk assessment with heavy metals total content leads to evaluation imprecision	中国云南野生牛肝菌中 As、Pb 和 Hg 平均含量显著高于其 他野生菌, 且 As 和 Hg 平均含量超标, IFS 为 1.56、2.33, 均 > 1, 表明野生牛肝菌 As、Hg 污染程度和食品安全风险等级 较高, 食用对人体健康具有一定的威胁 ^[5] Average content of As, Pb and Hg in wild <i>Boletus</i> from Yun- nan, China were higher than other wild mushrooms, and As and Hg exceeding the standard with IFS at 1.56 and 2.33 (IFS > 1); it indicates that wild <i>Boletus</i> has a high level of As and Hg contamination and food safety risk, posing a certain threat to human health ^[5]

续表 7

方法 Method	定义 Definition	公式 Formula	评价等级划分 Evaluation grade	优/缺点 Advantages/disadvantages	野生牛肝菌评价应用 Evaluation and application in wild <i>Boletus</i>
		$THQ = \frac{E_f \times E_D \times F_{IR} \times C}{RfD \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3}$ $E_f: \text{暴露频次}(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ $\text{Exposure frequency}(\text{time} \cdot \text{a}^{-1})$ $E_D: \text{暴露时间}(\text{a})$ $\text{Exposure time}(\text{a})$ $F_{IR}: \text{采食量}(\text{g} \cdot \text{次}^{-1})$ $\text{Feed intake}(\text{g} \cdot \text{time}^{-1})$ $C: \text{食品中金属的含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ $\text{Food heavy metal content}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ $RfD: \text{参考剂量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ $\text{Reference dose}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ $W_{AB}: \text{人体平均体重}(\text{kg})$ $\text{Average body weight}(\text{kg})$ $T_A: \text{非遗传毒性致癌物平均暴露天数}(\text{d})^{[40]}$ $\text{Average days of non-genotoxic carcinogens exposure}(\text{d})^{[40]}$	(1)THQ<1 对暴露人群无显著健康风险 THQ<1, no significant health risk to exposed population (2)THQ>1 对暴露人群存在健康风险,且 THQ 数值越大,风险越高 ^[40,53] THQ>1, there are health risks for the exposed population, and the higher the THQ value, the higher the risk ^[40,53]	优点:数据直观,清晰反映污染物的食用风险及风险强弱 Advantage: The data are intuitive and clearly reflect the edible risk levels 缺点:重金属的摄入量与人体有效吸收量存在差异,评价结果存在偏差 Disadvantage: The evaluation results can be inaccurate due to the total intake of heavy metals was different from the effective absorption amount by human body	(1)中国云南小美牛肝菌 Pb 和 Cd 的成人、儿童 THQ 值为 0.05、0.06 和 0.37、0.41,均<1,表明人群和儿童食用不易因 Pb、Cd 引起健康危害 ^[22] Adults and children THQ values of Pb and Cd were 0.05, 0.06 and 0.37, 0.41 (THQ<1) in <i>B. speciosus</i> from Yunnan, China, indicating that Pb and Cd have no potential risk to adults and children ^[22] (2)中国云南绒柄牛肝菌 Cd 成人和儿童 THQ 值为 7.37、8.10,均>1,表明人群和儿童食用,均存在较高的人体健康风险 ^[22] Adults and children THQ values of Cd were 7.37 and 8.10 (THQ>1) in <i>B. tomentipes</i> from Yunnan, China, indicating high risks to human health ^[22] (3)中国云南野生牛肝菌 As、Cd 和 Pb 的 THQ 值分别为 1.01、15.4 和 0.23,As 和 Cd 的 THQ>1,Pb 的 THQ<1,表明该牛肝菌中 As 和 Cd 的人体健康风险高于 Pb,且 Pb 无显著人体健康风险 ^[19] THQ values of As, Cd and Pb in wild <i>Boletus</i> from Yunnan, China were 1.01, 15.4 and 0.23. THQ _{As/Cd} >1 and THQ _{Pb} <1, indicating higher risk of As and Cd in <i>Boletus</i> than Pb, which has no significant human health risk ^[19]

续表 7

方法 Method	定义 Definition	公式 Formula	评价等级划分 Evaluation grade	优/缺点 Advantages/disadvantages	野生牛肝菌评价应用 Evaluation and application in wild <i>Boletus</i>
每周可耐受摄入量(PTWI) Provisional tolerable weekly intake (PTWI)	一周内可接受有毒金属的摄入量 Acceptable intake of toxic metals in a week	FAO/WHO 规定人体一周允许摄入的重金属量为(FAO/WHO heavy metals weekly intake allowable value): $b_w \times C_i$ b_w : 成人平均体质量, 通常按 60 kg 计算 Average adult body weight at 60 kg C_i : FAO/WHO 规定的重金属 i 的摄入量 Heavy metal (i) limit value of FAO/WHO	FAO/WHO 规定了人体对 Cd、Hg、As 和 Pb 的 PTWI 分别为 0.007、0.005、0.015 和 0.050 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [5,50] According to FAO/WHO, the PTWI of human body for Cd, Hg, As and Pb are 0.007, 0.005, 0.015 and 0.050 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [5,50]	优点 Advantages: (1)可根据人群每周允许摄入的重金属量和野生菌中该重金属的含量,推算每人一周允许食用的野生菌的量 The allowable amount of wild mushroom per person per week can be calculated according to the weekly intake of heavy metals and the content of the heavy metals in wild mushroom (2)也可通过人群每周食用的野生菌的量及其重金属含量,推算每周因食用野生菌摄入的重金属的量是否超标 Calculate whether the amount of heavy metal ingested by eating wild mushroom exceeding the standards according to the amount of wild mushroom and its heavy metal content consumed by people in each week 缺点 Disadvantages: (1)采用重金属全量与摄入量进行比对,无法真实反映人体的有效吸收量,存在评价偏差 There is evaluation inaccurate because the comparison between total and intake limit cannot truly reflect the effective absorption amount of human body (2)未考虑其他摄入,可能低估风险 Risk might be underestimated for excluding other intakes	(1)中国云南玉溪美味牛肝菌盖、柄的总 Hg 含量为 24.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 8.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根据成人每周允许摄入的 Hg 为 0.24 mg ,一周菌盖可食用量仅为 109 g(鲜质量),菌柄为 285 g(鲜质量) [57] The total Hg contents in <i>B. edulis</i> cap and stipe were 24.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 8.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ from Yuxi, Yunnan, China; according to the weekly intake of Hg for adults is 0.24 mg , therefore the weekly edible consumption of mushroom cap and stipe are only 109 g (fresh weight) and 285 g (fresh weight) per week, respectively [57] (2)采自中国云南昆明的牛肝菌盖、柄 As 含量均值为 13.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 17.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,若成年人每周食用 500 g 新鲜牛肝菌,则通过牛肝菌摄入的 As 均低于 FAO/WHO 规定的 PTWI 标准($\text{As} \leq 0.975 \text{ mg}$);因此,每周食用 500 g 新鲜牛肝菌理论上未达到 As 暴露水平 [44] Average content of As in cap and stipe of <i>Boletus</i> collected from Kunming, Yunnan, China were 13.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 17.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; As intake via <i>Boletus</i> was lower than PTWI standard of FAO/WHO ($\text{As} \leq 0.975 \text{ mg}$) basing on 500 g fresh <i>Boletus</i> per week; therefore, consumption of 500 g fresh <i>Boletus</i> per week theoretically did not achieve As exposure level [44] (3)采自中国云南 17 种野生牛肝菌盖和柄 Cd 含量分别为 3.03 ~ 18.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 2.13 ~ 10.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。食用 500 g 新鲜牛肝菌盖或柄,摄入 Cd 的质量分别为 0.15 ~ 0.94 mg 和 0.11 ~ 0.50 mg ,与 60 kg 成年人每周 Cd 允许摄入量 0.42 mg 相比,食用 500 g 新鲜的牛肝菌所摄入的 Cd 低于 PTWI 标准 [17] Cd contents of 17 wild <i>Boletus</i> cap and stipe from Yunnan, China were 3.03 ~ 18.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and 2.13 ~ 10.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; the intake of Cd from 500 g fresh <i>Boletus</i> cap or stipe was 0.15 ~ 0.94 mg and 0.11 ~ 0.50 mg ; the intake of Cd from 500 g of fresh <i>Boletus</i> was lower than the PTWI standard, compared with the weekly intake of 0.42 mg for 60 kg adult [17] (4)中国云南野生牛肝菌 Cd、As 和 Pb 的实际周摄入量分别为 0.020、0.019 和 0.010 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 含量处于安全水平,而 Cd 和 As 实际周摄入量高于 PTWI 标准限值(Cd 0.007、As 0.015 和 Pb 0.050 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),具有较高人体健康风险 [19] Actual weekly intakes of Cd, As and Pb in wild <i>Boletus</i> from Yunnan, China were 0.020, 0.019 and 0.010 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and Pb content was at the safe level; however, the actual weekly intake of Cd and As were higher than the PTWI standard limits (Cd 0.007, As 0.015, Pb 0.050 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), which had high human health risks

(Physiologically Based Extraction test)、UBM(Unified BARGE Method)等,体外胃肠液模拟法具有操作简单、省时高效、经济低耗等优点,目前已被广泛用于测定土壤、农产品和室内灰尘等环境介质中污染物的生物有效性^[62]。但其评价结果在准确性和直接性方面不如体内实验结果。因此,通常需要建立体内、外相关性模型综合评价污染物的生物有效性。

体内动物模型活体实验是研究农产品中重金属生物有效性的常用方法。小鼠、兔子、狗、猪、牛和灵长类动物等为常见的动物模型。小鼠是最常用于生物有效性实验的脊椎动物,具有周期短、耗资少等优点^[63]。众多学者已经基于体内、体外实验测定的生物有效性结果分析,建立了不同体外模拟方法下重金属的体内、体外相关性模型,证实了体外模拟方法预测生物有效性的可靠性^[64]。比如,SBRC 方法已在国内外土壤 As 的生物有效性研究中建立了良好的体内、外相关性模型^[65]。

值得关注的是,已有少量研究借助生物有效性评价野生牛肝菌中重金属的人体健康风险,但尚缺乏基于模型动物活体实验获得的生物有效性的人体健康风险评价模型。表 8 对比了重金属全量和生物有效性在野生牛肝菌中重金属的人体健康风险评价方面的差异。结果表明,基于重金属全量所得的风险值往往高于以生物有效性为摄入量的风险值。因此,今后研究需重点关注污染物生物有效性相关方面的评价。

3 结语 (Conclusions)

野生牛肝菌受重金属(Cd、Hg、As 和 Pb)污染现象普遍。按元素种类划分,野生牛肝菌吸收并积累

重金属元素的能力大小顺序为 Cd>Hg>As>Pb,Cd 和 Hg 是牛肝菌的特征污染元素,应高度关注牛肝菌类野生菌对 Cd 和 Hg 的吸收富集机制与关键环境影响因子,以及相应的食品安全与人体健康风险。按牛肝菌品种划分,美味、灰褐和绒柄 3 种牛肝菌是较易积累重金属元素(尤其是 Cd 和 Hg)的野生牛肝菌品种,应加强其食品安全监测和管控。此外,野生牛肝菌子实体可以检出不同形态的 As 和 Hg,但普遍研究仅关注总 As 和总 Hg,毒性较强的无机砷和甲基汞长期被忽视,且我国《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)也未限定不同形态 As 和 Hg 的含量,这不利于野生牛肝菌的产业发展及其食品安全/人体健康风险评估。

各野生牛肝菌盖和柄中重金属的含量存在差异,对于特征污染元素 Cd 和 Hg,牛肝菌盖含量显著高于柄,但造成这种差异化分布的原因尚不清楚,需深入探讨 Q_{CS} 普遍>1 的现象是否与牛肝菌解毒机制和/或大气中的 Cd、Hg 污染有关。

野生牛肝菌中重金属含量存在地域性分布差异可能与区域土壤、大气和水体环境中 Cd、Hg、As 和 Pb 的污染有关,但目前仅有少数研究分析野生牛肝菌中 4 种重金属元素的吸收富集能力(BCF),而对环境因子与野生菌中重金属的相关性水平研究不足。因此,应展开研究调查野生菌中重金属的来源,探讨野生菌对重金属的转运、富集机制,为野生菌重金属的吸收阻控提供理论支撑。

对于野生菌重金属的人体健康风险评估仍缺乏科学、系统的评价体系,前期以重金属全量为膳食摄入量,而忽略人体有效吸收量的评价方法可能高估风险。目前仅有的以 PBET 体外胃肠液模拟方法测

表 8 野生牛肝菌重金属全量与生物有效性在人体健康风险评价中的比较
Table 8 Comparison analysis on human health risk assessment based on heavy metals
total content and bioavailability in wild *Boletus*

评价方法 Evaluation method	全量评价 Total content evaluation	生物有效性评价(PBET) Bioavailability evaluation (PBET)	结果比较 Result comparison	参考文献 References
牛肝菌中 Cd 的 EDI EDI of Cd in <i>Boletus</i>	7.42(成人 Adult) 6.98(儿童 Child)	0.04(成人 Adult) 0.04(儿童 Child)	风险显著降低 Risk significantly decreased	[13]
牛肝菌中 Pb 的 EDI EDI of Pb in <i>Boletus</i>	0.43(成人 Adult) 0.40(儿童 Child)	0.02(成人 Adult) 0.02(儿童 Child)	风险显著降低 Risk significantly decreased	
牛肝菌中 As 含量/(mg·kg ⁻¹) As content of <i>Boletus</i> /(mg·kg ⁻¹)	2.30	1.00(胃相 Gastric phase) 1.00(胃+肠相 Gastric and Intestinal phase)	有效量降低约 57%, 风险减弱 The effective dose was reduced by ~57% and the risk decreased	[48]

定的野生菌中重金属的生物有效性,缺乏以动物模型活体实验测定的生物有效性为支撑,结果的可靠性有待考证。因此,今后研究可重点关注体内、外相关性模型的创建,以精准评估野生菌中重金属的人体健康风险,保障食品安全和人类饮食健康。

通讯作者简介:刘雪(1987—),女,博士,副研究员,主要研究方向为环境污染、食品安全与人体健康。

参考文献(References):

- [1] Rathore H, Prasad S, Sharma S. Mushroom nutraceuticals for improved nutrition and better human health: A review [J]. *Pharma Nutrition*, 2017, 5(2): 35-46
- [2] 孙丽平, 常惟丹, 鲍长俊, 等. 云南产6种野生食用牛肝菌的营养成分及抗氧化特性研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(12): 279-286
- Sun L P, Chang W D, Bao C J, et al. Nutritive components and antioxidative characteristics of six wild edible *Boletus* mushrooms from Yunnan Province [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(12): 279-286 (in Chinese)
- [3] 郝斐. 云南野生菌出口竞争力分析: 以松茸和牛肝菌为例[J]. *当代经济*, 2017(21): 112-113
- [4] 张银烽, 赵晓慧, 许燕. 2013—2017年云南不同地区常见牛肝菌中总汞及甲基汞含量分布及安全评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 8106-8111
- Zhang Y F, Zhao X H, Xu Y. Distribution and safety assessment of total mercury and methylmercury in common *Boletus* from different regions of Yunnan Province from 2013 to 2017 [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(21): 8106-8111 (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 黄擎, 李维, 郭相, 等. 重金属在食用菌中的富集研究进展[J]. *中国食用菌*, 2014, 33(2): 4-6
- Huang Q, Li W, Guo X, et al. Research progress on accumulation of heavy metal in edible fungi [J]. *Edible Fungi of China*, 2014, 33(2): 4-6 (in Chinese)
- [7] Wang X M, Zhang J, Wu L H, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China [J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 279-285
- [8] 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*, 2014, 49(11): 815-827
- [9] Kaláč 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
- [10] Yin L L, Shi G Q, Tian Q, et al. Determination of the metals by ICP-MS in wild mushrooms from Yunnan, China [J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(8): T151-T155
- [11] Falandysz J, Zhang J, Wiekaj 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
- [12] Mędyk M, Grembecka M, Brzezicha-Cirocka J, et al. Bio- and toxic elements in mushrooms from the city of Umeå and outskirts, Sweden [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2017, 52(8): 577-583
- [13] 李梦莹, 王坤, 保欣晨, 等. 云南野生牛肝菌中重金属的生物有效性及健康风险评估[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 162-169
- Li M Y, Wang K, Bao X C, et al. Bioavailability and human health risk assessment of heavy metals in wild dried bolete grown in Yunnan [J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 162-169 (in Chinese)
- [14] 张钰, 李杰庆, 李涛, 等. 不同部位矿质元素与红外光谱数据融合对美味牛肝菌产地溯源研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(10): 3070-3076
- Zhang Y, Li J Q, Li T, et al. Discrimination of geographical origins of *Boletus edulis* using data fusion combined mineral elements with FTIR spectrum of different parts [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(10): 3070-3076 (in Chinese)
- [15] 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, China University (Natural Science Edition)*, 2012, 49(1): 246-252 (in Chinese)
- [16] 杨天伟, 张霖, 李杰庆, 等. 红外光谱法对牛肝菌种类鉴别及镉含量预测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(9): 2730-2736
- Yang T W, Zhang J, Li J Q, et al. Study on the discrimination of species of bolete mushrooms and content prediction of cadmium by infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy*

- py and Spectral Analysis, 2017, 37(9): 2730-2736 (in Chinese)
- [17] 杨天伟, 张霁, 李涛, 等. 云南野生食用牛肝菌中镉含量测定及食用安全评估[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 354-359
- Yang T W, Zhang J, Li T, et al. Determination of content of cadmium and health risk assessment in wild-grown bolete mushrooms from Yunnan Province [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 354-359 (in Chinese)
- [18] Su J Y, Zhang J, Li J Q, et al. Determination of mineral contents of wild *Boletus edulis* mushroom and its edible safety assessment [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2018, 53(7): 454-463
- [19] 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
- [20] 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)
- [21] 陈凤霞, 杨天伟, 李杰庆, 等. 云南牛肝菌不同部位三种重金属含量特征及风险评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 225-232
- Chen F X, Yang T W, Li J Q, et al. Content characteristics and risk assessment of three heavy metals in different parts of Boletaceae in Yunnan Province [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 225-232 (in Chinese)
- [22] 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
- [23] Širić I, Kasap A, Bedeković D, et al. Lead, cadmium and mercury contents and bioaccumulation potential of wild edible saprophytic and ectomycorrhizal mushrooms, Croatia [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2017, 52(3): 156-165
- [24] 邢博, 张霁, 李杰庆, 等. ICP-MS法测定云南省8种野生牛肝菌中矿质元素含量[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)
- [25] 王英, 张银, 张薇, 等. ICP-MS法同时测定云南野生牛肝菌中5种金属元素[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 301-304
- Wang Y, Zhang Y, Zhang W, et al. Simultaneous detection of five elements of wild edible *Boletus* in Yunnan Province by ICP-MS [J]. The Food Industry, 2018, 39(9): 301-304 (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] Wang X M, Zhang J, Li T, et al. ICP-AES determination of mineral content in *Boletus tomentipes* collected from different sites of China [J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2015, 35(5): 1398-1403
- [28] Li T, Wang Y Z, Zhang J, et al. Trace element content of *Boletus tomentipes* mushroom collected from Yunnan, China [J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1828-1830
- [29] 赵迎春, 鲍长俊, 孙丽平. 云南省不同产地灰褐牛肝菌矿质元素含量测定及相关性分析[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2017, 26(5): 349-354
- Zhao Y C, Bao C J, Sun L P. Determination and analysis of mineral elements in *Boletus griseus* from different places of Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2017, 26(5): 349-354 (in Chinese)
- [30] 鲍长俊, 常惟丹, 庄永亮, 等. 灰褐牛肝菌(*Boletus griseus*)子实体的营养评价及蛋白质组分分析[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 83-89
- Bao C J, Chang W D, Zhuang Y L, et al. Nutritional characteristics and protein composition of fruiting bodies of *Boletus griseus* [J]. Food Science, 2017, 38(20): 83-89 (in Chinese)
- [31] 林佳, 许燕, 赵世文, 等. 云南省8种常见野生食用牛肝菌中总砷、总汞、铅、镉含量的检测及食用安全性评价[J]. 职业与健康, 2016, 32(9): 1203-1205
- Lin J, Xu Y, Zhao S W, et al. Detection of total arsenic, total mercury, lead and cadmium contents in 8 kinds of common wild edible *Boletus* in Yunnan Province and food safety evaluation [J]. Occupation and Health, 2016, 32(9): 1203-1205 (in Chinese)
- [32] 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
- [33] Mleczek M, Siwulski M, Stuper-Szablewska K, et al. Accumulation of elements by edible mushroom species: Part I. Problem of trace element toxicity in mushrooms [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2013, 48(1): 69-81
- [34] Zhang D, Frankowska A, Jarzyska G, et al. Metals of king bolete (*Boletus edulis*) Bull. Fr. collected at the same site over two years [J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(22): 3050-3055
- [35] 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)
- [36] 高婧, 张念恒, 李雪春, 等. 几种食用菌中重金属含量的测定与分析[J]. 广州化工, 2019, 47(22): 120-122
- Gao J, Zhang N H, Li X C, et al. Determination and analysis of heavy metals content in several edible fungi [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(22): 120-122 (in Chinese)
- [37] 李杰庆, 杨天伟, 张霁, 等. 云南省野生牛肝菌总汞含量测定分析及健康风险评估[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(3): 523-535
- Li J Q, Yang T W, Zhang J, et al. Determination of total mercury and health risk as assessment in wild-grown bolete mushrooms from Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(3): 523-535 (in Chinese)
- [38] 杨天伟, 张霁, Jerzy Falandysz, 等. 云南常见牛肝菌属真菌中汞含量及食用安全评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3518-3525
- Yang T W, Zhang J, Falandysz J, et al. Mercury concentration in common *Boletus* fungi from Yunnan Province and ingestion safety assessment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3518-3525 (in Chinese)
- [39] Falandysz J, Krasnińska G, Pankavec S, et al. Mercury in certain boletus mushrooms from Poland and Belarus [J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2014, 49(9): 690-695
- [40] Kojta A K, Falandysz J. Metallic elements (Ca, Hg, Fe, K, Mg, Mn, Na, Zn) in the fruiting bodies of *Boletus badius* [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 206-214
- [41] Mleczek M, Siwulski M, Mikołajczak P, et al. Bioaccumulation of elements in three selected mushroom species from southwest Poland [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2015, 50(3): 207-216
- [42] Falandysz J. Mercury accumulation of three *Lactarius* mushroom species [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 96-101
- [43] 杨玲春, 丁元明, 王英, 等. HPLC-ICP-MS 法测定牛肝菌中汞的形态[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 108-112
- Yang L C, Ding Y M, Wang Y, et al. Determination of mercury species in *Boletus* by HPLC-ICP-MS [J]. Food Research and Development, 2018, 39(9): 108-112 (in Chinese)
- [44] 杨天伟, 张霁, 刘鸿高, 等. 云南野生牛肝菌中砷元素含量测定及食用安全评价[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 755-761
- Yang T W, Zhang J, Liu H G, et al. Determination and food safety assessment of arsenic in wild-grown bolete mushrooms from Yunnan Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 755-761 (in Chinese)
- [45] Falandysz J, Rizal L M. Arsenic and its compounds in mushrooms: A review [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part C, 2016, 34(4): 217-232
- [46] 周春艳, 何健, 唐晓琴, 等. 离子色谱-电感耦合等离子体质谱法测定野生食用菌中 6 种砷形态[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(14): 1980-1982, 1986
- Zhou C Y, He J, Tang X Q, et al. Determination of 6 arsenic species in wild edible mushrooms by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2017, 27(14): 1980-1982, 1986 (in Chinese)
- [47] 甘源, 唐晓琴, 何健, 等. 重庆市野生食用菌中总砷及砷形态含量调查[J]. 现代预防医学, 2017, 44(22): 4073-4076
- Gan Y, Tang X Q, He J, et al. Investigation and analysis of the total arsenic and arsenic species content in wild edible fungus in Chongqing City [J]. Modern Preventive Medicine, 2017, 44(22): 4073-4076 (in Chinese)
- [48] Koch I, Dee J, House K, et al. Bioaccessibility and speciation of arsenic in country foods from contaminated sites in Canada [J]. Science of the Total Environment, 2013, 449: 1-8
- [49] 刘烨潼, 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, 452
- Liu Y T, Chen Q S, Zhang Q, et al. Assessing health risk of heavy metals in mushroom [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(2): 440-443, 452 (in Chinese)

- [50] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Summary and conclusions [C]. Proceedings of the Seventy-Second Meeting. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations World Health Organization, 2010
- [51] 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)
- [52] 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)
- [53] Igbiri S, Udowelle N A, Ekhatior 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, 2018, 9(1): 31-41
- [54] 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 International, 2016, 23(14): 14549-14559
- [55] 兰珊珊, 林涛, 林昕, 等. 食品安全指数法评估西南地区食用菌中农药残留风险[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 199-204
- Lan S S, Lin T, Lin X, et al. Risk assessment of pesticide residues in edible mushrooms in Southwest China based on food safety indexes [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(1): 199-204 (in Chinese)
- [56] Fang Y, Sun X Y, Yang W J, et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China [J]. Food Chemistry, 2014, 147: 147-151
- [57] Severoglu Z, Sumer S, Yalcin B, et al. Trace metal levels in edible wild fungi [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10(2): 295-304
- [58] 李梦莹, 王成尘, 毕珏, 等. 食品中重金属的人体健康风险评估方法研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(1): 1-9
- Li M Y, Wang C C, Bi J, et al. Human health risk assessment of heavy metals in food: A review [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 50(1): 1-9 (in Chinese)
- [59] Feng X B, Li P, Qiu G L, et al. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province, China [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(1): 326-332
- [60] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. Chemosphere, 2016, 144: 346-351
- [61] Xu L, Lu A X, Wang J H, et al. Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 122: 214-220
- [62] 李洁. 污染土壤中铅砷的人体生物有效性研究[D]. 南京: 南京大学, 2016: 11-12
- Li J. Human bioavailability of lead and arsenic in contaminated soils [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016: 11-12 (in Chinese)
- [63] 徐笠, 陆安祥, 王纪华, 等. 食物中重金属的生物可给性和生物有效性的研究方法和应用进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 89-97
- Xu L, Lu A X, Wang J H, et al. Research methods and applications of bioaccessibility and bioavailability of heavy metals in food [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(1): 89-97 (in Chinese)
- [64] Li J, Li C, Sun H J, et al. Arsenic relative bioavailability in contaminated soils: Comparison of animal models, dosing schemes, and biological end points [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(1): 453-461
- [65] 冯凯, 鲍建国, 孔淑琼, 等. SBRC 体外模拟法对含砷矿物生物可给性的研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(11): 33-43
- Feng K, Bao J G, Kong S Q, et al. Bioaccessibility of arsenic bearing minerals using *in vitro* extraction method of SBRC [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(11): 33-43 (in Chinese) ◆