DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260422002
引用格式: 刘贵荣, 刘文政, 付贤杰, 等. 食用菌中砷形态与生物可给性对膳食健康风险的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 241–248.
Liu Guirong, Liu Wenzheng, Fu Xianjie, et al. Influence of arsenic speciation and bioaccessibility in edible fungi on dietary health risks [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 241–248. (in Chinese with English abstract).

食用菌中砷形态与生物可给性对膳食健康风险的影响

刘贵荣, 刘文政, 付贤杰, 周立强*
(贵州省疾病预防控制中心, 贵阳 550000)

摘 要: 目的 探究不同食用菌中砷形态组成及其生物可给性差异, 并评估其对膳食健康风险结果的影响。**方法** 以贵州省 18 种常见食用菌为研究对象, 采用砷形态分析、体外生理学提取试验, 结合每日预估摄入量、目标危害系数和目标致癌风险模型, 定量解析胃肠消化过程中砷形态转化规律并开展健康风险评价。**结果** 供试食用菌中总砷质量浓度为 0.0245~0.7458 mg/kg, 仅姬松茸超过我国限量标准(GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定 0.5 mg/kg); 无机砷占总砷比例为 2.83%~90.04%, 其生物可给性为 0.00~70.42%, 不同菌种间差异显著; 经生物可给性校正后, 有毒无机砷含量降至 0~0.1138 mg/kg, 与此同时, 消化液中无机砷的预估每日摄入量、目标危害系数、目标致癌风险评估结果降至更贴近实际暴露水平。**结论** 砷形态与胃肠消化过程中的生物可给性显著影响食用菌中砷健康风险评估结果, 将二者同时纳入风险评估框架, 可有效提高评价准确性, 为制定食用菌砷污染防控策略与食品安全标准提供科学依据。

关键词: 食用菌; 砷形态; 生物可给性; 健康风险评估; 体外消化
中图分类号: R155.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0241–08

Influence of arsenic speciation and bioaccessibility in edible fungi on dietary health risks

LIU Gui-Rong, LIU Wen-Zheng, FU Xian-Jie, ZHOU Li-Qiang*
(*Guizhou Center for Disease Control and Prevention*, *Guiyang* 550000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the speciation composition of arsenic and the differences in arsenic bioaccessibility among various edible mushrooms, and to evaluate their impacts on dietary health risk assessment outcomes. **Methods** The 18 kinds of common edible mushroom species collected in Guizhou Province were selected as research materials. Arsenic speciation analysis and *in vitro* physiologically based extraction test were performed. Combined with estimated daily intake, target hazard quotient and target cancer risk models, the transformation pattern of

收稿日期: 2026-04-22
基金项目: 贵州省疾病预防控制中心青年基金课题项目(2025-E-1)
第一作者: 刘贵荣(1993—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全与环境检测。E-mail: 1174651802@qq.com
***通信作者:** 周立强(1996—), 男, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品安全与环境检测。E-mail: 13951348482@qq.com

arsenic species during gastrointestinal digestion was quantitatively elucidated, and subsequent health risk assessment was conducted. **Results** The total arsenic concentrations in the tested edible mushrooms ranged from 0.0245 to 0.7458 mg/kg. Only *Agaricus blazei* exceeded the national limit specified in GB 2762—2022 *National food safety standards-Limits of contaminants in food* (stipulates 0.5 mg/kg). The proportion of inorganic arsenic to total arsenic varied from 2.83% to 90.04%, with its bioaccessibility ranging between 0.00 and 70.42%, showing significant interspecies differences. After bioaccessibility correction, the concentration of toxic inorganic arsenic decreased to 0–0.1138 mg/kg, meanwhile, the estimated daily intake, target hazard quotient and target cancer risk of inorganic arsenic in digestive fluids were reduced to values closer to the actual human exposure levels. **Conclusion** Arsenic speciation and the bioaccessibility during gastrointestinal digestion exert prominent influences on health risk assessment of arsenic in edible mushrooms. Incorporating both indicators into the risk assessment framework can substantially improve the accuracy of risk evaluation, and provide scientific evidence for the formulation of arsenic pollution prevention and control strategies as well as food safety standards for edible mushrooms.

KEY WORDS: edible fungi; arsenic speciation; bioaccessibility; health risk assessment; *in vitro* digestion

0 引 言

食用菌兼具重要的营养与药用价值，是全球膳食结构的重要组成部分。由于其独特的生长环境与生物富集特性，食用菌易累积重金属及外源污染物。其中砷因毒性强、富集效率高且毒性具有显著形态依赖性，成为食品安全领域重点关注的污染物之一[1–2]。

砷的毒性与生物可给性高度依赖其化学形态：无机砷(inorganic arsenic, iAs)，如三价砷[arsenite, As(III)]、五价砷[arsenate, As(V)]具有强致癌性，而砷胆碱(arsenocholine, AsC)、砷甜菜碱(arsenobetaine, AsB)、二甲基砷(dimethylarsinic acid, DMA)、一甲基砷(monomethylarsonic acid, MMA)等有机砷形态通常毒性较低或基本无毒[3–4]。值得注意的是，砷形态在生物体内会发生代谢转化，部分低毒有机砷可在体内降解为毒性更强的 iAs，进一步增加了健康风险评估的复杂性[5]。尽管国际癌症研究机构已将 iAs 列为I类致癌物，但现有研究多集中于水体与谷物类食品，针对食用菌砷形态分布、生物可给性及动态转化机制的系统性研究仍较为缺乏[6–9]。

近年来，多项区域性调查证实食用菌中砷污染问题普遍存在[10–11]。例如，我国市售食用菌调查发现，蜜环菌、毛头鬼伞等常见品种的总砷(total arsenic, TAs)平均含量达 0.22 mg/kg, iAs 致癌风险值(3.82×10^{-6}~8.61×10^{-5})接近国际公认阈值(1×10^{-6})[12–13]。有研究采用体外消化/Caco-2 细胞模型，分析典型地球化学高背景区野生干牛肝菌中砷的含量、生物可给性与形态，评估其健康风险与肠道毒性，结果显示砷含量超出我国食品安全标准 1.29~56.30 倍[14]。但上述研究存在局限明显：多数仅针对单一品种开展风险评估，极少将砷形态与生物可给性系统结合；尤为关键的是，针对贵州特色食用菌的多品种联合风险评估研究较少[15–16]。

生物可给性是反映污染物在胃肠环境中被溶解、释放并可供机体吸收的关键指标，是连接环境浓度与人体健康风险的核心环节[17]。近年来，基于体外消化模型的研究证实，食物基质组成与消化液理化性质显著影响砷形态转化与释放效率[18–20]。然而，现有研究仍缺乏对食用菌中砷形态转化与生物可给性的系统性解析，如何将生物可给性科学融入膳食风险评估体系，仍需进一步探索[21–22]。

生理基础提取试验(physiologically based extraction test, PBET)是目前食品、土壤基质中重金属/类金属生物可给性检测应用最广泛的体外胃肠模拟模型[15]。该模型完整复刻人体口腔、胃部、小肠连续消化生理过程；精准匹配人体消化液组分、消化温度、振荡速率、pH 梯度与消化时长，相比体外胃肠道法(*in vitro* gastrointestinal, IVG)、溶解度生物可给性研究联盟法(solubility bioavailability research consortium, SBRC)等简化体外消化模型，更贴合生鲜食用菌这类富含多糖、膳食纤维、植物蛋白的基质。为此，本研究以贵州省 18 种主流消费食用菌为研究对象，测定 TAs 含量及砷形态分布；采用 PBET 法模拟胃肠消化过程，揭示砷形态动态转化规律与生物可给性特征；结合预估每日摄入量(estimated daily intake, EDI)、目标危害系数(target hazard quotient, THQ)、目标致癌风险(target cancer risk, TCR)模型，引入生物可给性校正因子，搭建更贴近人体真实砷暴露剂量的膳食风险评估模型。研究结果可为基于砷形态的食品安全标准制定提供理论支撑，提升食用安全预警精度，助力区域食用菌膳食砷暴露风险的精准防控。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

18 种食用菌采自贵州省各主产区。

砷、锗单元素标准物质溶液(质量浓度为 1000 μg/mL，国家有色金属及电子材料分析测试中心)；食用菌中元素成分分析标准物质(GBW10247，回收率为 80%~120%)、人

工唾液、人工胃液、人工十二指肠液、人工胆汁(上海源叶生物科技有限公司); 硝酸、盐酸、过氧化氢、碳酸氢钠、磷酸二氢铵(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 水相针式过滤器(0.22 μm, 上海安谱实验科技股份有限公司); 所有溶液均采用超纯水制备。

UltiMate 3000 高效液相色谱仪、iCAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); Ethos A 微波消解系统(意大利 Milestone 公司); Milli-Q integral 超纯水处理系统(美国 Millipore 公司); AL204 分析天平(精度 0.1 mg, 美国 Mettler 公司); VL-220R 冷冻离心机(中国 MKE 公司); DMV-16 恒温振荡器(中国 Keyin Tech 公司)。

1.2　试验方法

1.2.1　样品采集

18 种食用菌在不同栽培棚采用随机布点法设置多个采样点, 每个采样点采集不少于 500 g, 取可食部分经超纯水洗净、沥干、粉碎后等量制成混合样品, 于–18 ℃冷冻保存备用。

1.2.2　TAs 测定

称取 0.5 g 样品于消解罐中, 加入 4 mL 14 mol/L 硝酸溶液预溶 4 h 后, 再加入 1 mL 体积分数 30%的过氧化氢溶液, 经微波消解(1600 W, 180 ℃, 60 min)并冷却后定容至 25 mL, 过滤后取滤液采用电感耦合等离子体质谱仪进行测定。

1.2.3　砷的生物可给性测定

先将 0.5 g 食用菌样品加入到 5 mL 唾液中并孵育 10 min 以代表口腔中的消化; 然后加入 10 mL 胃液(pH=1.5~2.0), 并将混合物振摇 2 h 以代表胃中的消化, 最后, 向混合物中加入 10 mL 十二指肠液、5 mL 胆汁和 2 mL 碳酸氢钠溶液, 振摇 4 h, 以代表在小肠(pH=7.0)中的消化, 通过向混合物中加入 0.1 mL 6 mol/L 盐酸溶液以终止消化过程。在以上消化过程中, 混合物全在 37 ℃条件下振荡(60 r/min)孵育, 将获得的混合物以 3000 r/min 离心 5 min, 取上清液过滤, 采用电感耦合等离子体质谱法进行测定。生物可给性计算如公式(1)所示:

$$\text{生物可给性}=\frac{C_1\times V_1+C_2\times V_2}{C_{\text{v}}\times m}\times 100\% \tag{1}$$

式中: C_1 为胃消化阶段上清液中 iAs 质量浓度, mg/L; C_2 为肠消化阶段上清液中 iAs 质量浓度, mg/L; V_1 为胃液总体积, L; V_2 为肠液总体积, L; C_{v} 为食用蘑菇中 iAs 质量浓度, mg/kg; m 为体外消化所用食用蘑菇总质量, kg。

1.2.4　砷形态测定

采用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱技术, 对食用菌样品和消化液中砷组分进行分离测定。

1.2.5　膳食健康风险评价模型

(1) EDI 计算

EDI (μg/kg·d)是通过假定每人每天平均摄入量来计算所有的风险限值和因素, 计算如公式(2)所示:

$$\text{EDI}=\frac{M_{\text{C}}\times \text{IR}}{B_{\text{W}}} \tag{2}$$

式中: M_{C} 为 As 实测值, mg/kg; IR 为食用菌日均摄入量(intake rate), 取 80 g/d[17]; BW 为成人平均体重(body weight), 取 64.3 kg[17]。

(2) THQ 计算

使用 THQ 对食用菌中的 As 含量进行健康风险评估。THQ 的计算如公式(3)所示:

$$\text{THQ}=\frac{\text{EDI}}{R_{\text{FD}}}\times 10^{-3} \tag{3}$$

式中: R_{FD} 为每日每千克体重非致癌经口参考剂量, As 为 0.0003 mg/(kg•d)[23]。THQ<1 表示经食物摄入对暴露人群健康风险不显著; THQ>1 表示暴露人群存在健康风险, 单一重金属 THQ 越高, 对人体健康危害越大。

(3) TCR 计算

TCR 用于评估终身接触致癌物的潜在风险。该公式利用经口斜率因子而不是经口参考剂量来计算暴露个体的估计终生癌症风险, 其计算如公式(4)所示:

$$\text{TCR}=\text{EDI}\times\text{OSF}\times 10^{-3} \tag{4}$$

式中: OSF 为经口斜率因子(oral slope factor): As 为 1.5 mg/(kg•d)[24–25]。风险类别: TCR<1×10^{-6} 为非显著风险; $1\times10^{-6}\leqslant$TCR<1×10^{-4} 为具有一定致癌风险, TCR$\geqslant1\times10^{-4}$ 为高致癌风险。

1.3　数据处理

采用 SPSS 27.0 进行统计分析, 每种食用菌平行取 10 份样品进行测定, Microsoft Excel 2021.3.61.40 版本完成表格的制作。

2　结果与分析

2.1　食用菌中 TAs 含量情况

对供试食用菌样品中的 TAs 含量进行 10 次平行测定后发现, 不同品种间 TAs 含量存在明显差异, 含量范围为 0.0245~0.7458 mg/kg(表 1)。在所有检测样品中, 姬松茸的 TAs 含量最高, 达到(0.7458±0.0350) mg/kg, 已经超出 GB 2762—2022 食品安全标准中规定的 0.5 mg/kg 限量要求, 是本次调查中唯一出现超标的品种。紧随其后的是杏鲍菇、平菇、双孢菇和黄菇, TAs 含量分别为(0.4810±0.1973)、(0.4629±0.0282)、(0.4477±0.0516)、(0.4090±0.0904) mg/kg, 整体处于中等偏上水平; 而猴头菇、金耳、鹿茸菇、黑木耳与香菇等品种的 TAs 含量普遍偏低, 整体处于低暴露水平。

从富集机制来看, 姬松茸对砷具有较强的生物富集特性, 其砷累积主要来源于栽培基质, 包括牛粪、农作物秸秆、田间土壤以及灌溉水等带来的外源砷输入[26–27]; 与之不同, 香菇、黑木耳、猴头菇等典型木质腐生菌, 以木

屑、棉籽壳等作为主要栽培原料，基质本身砷本底值较低，因此子实体中 TAs 含量整体偏低。从整体污染水平判断，贵州省常见食用菌的 TAs 含量整体安全可控，仅姬松茸需要作为重点监控与源头管控对象。

表 1 食用菌中 TAs 含量

Table 1 TAs content of edible mushrooms

食用菌种类	平均值/(mg/kg)	RSDs/%
金针菇	0.3480	0.1715
杏鲍菇	0.4810	0.1973
黄菇	0.4090	0.0904
猪肚菇	0.1663	0.0340
草菇	0.1524	0.0611
香菇	0.0556	0.0054
鹿茸菇	0.0454	0.0045
赤松茸	0.1624	0.0103
黑皮鸡枞菌	0.2213	0.0106
毛木耳	0.0839	0.0105
黑木耳	0.0552	0.0105
双孢菇	0.4477	0.0516
平菇	0.4629	0.0282
姬松茸	0.7458	0.0350
羊肚菌	0.1153	0.0080
竹荪	0.1050	0.0098
猴头菇	0.0245	0.0079
金耳	0.0459	0.0070

2.2 食用菌中砷形态分布特征

在 TAs 含量分析的基础上，进一步对 6 种砷形态进行定量解析，结果显示(表 2)，食用菌中砷的赋存形态在品种间呈现极显著差异，其中 iAs 占 TAs 比例为 2.83%~90.04%，说明不同菌种对砷的吸收、转化与解毒路径存在明显区别。在检测的 6 种形态中，As(III)和 AsB 是主要的赋存形态，平均含量分别为 0.0556 mg/kg 和 0.0654 mg/kg。

从毒性结构上看，平菇的 iAs 占比高达 90.04%，以 As(III)和 As(V)为主导，是所有样品中毒性风险最突出的品种；香菇、黄菇、羊肚菌、猴头菇、金耳等品种的 iAs 占比在 51%~74%之间，同样以高毒 iAs 为主要存在形态；与之形成鲜明对比的是，姬松茸的 iAs 占比仅为 2.83%，主要以低毒的 AsB 和 MMA 存在，毒性水平显著偏低；双孢菇、赤松茸、竹荪、草菇等品种的 iAs 占比均低于 26%，有机砷占比更高。上述差异主要由菌种自身砷代谢能力、细胞壁通透性以及栽培基质环境共同决定[28–29]，这也充分说明，仅依靠 TAs 含量来判断食用菌的砷污染风险存在明显偏差，iAs 含量与占比才是毒性评价的核心依据。

2.3 消化液中砷形态分布情况

为更贴近人体实际暴露情况，采用 PBET 法模拟口腔–胃–肠连续消化过程，系统分析砷在消化液中的释放、转化规律及生物可给性特征。结果显示(表 3)，不同食用菌中 iAs

表 2 食用菌中砷形态分布(mg/kg)

Table2 Distribution of arsenic species in edible mushrooms (mg/kg)

编号	As(III)	As(V)	MMA	DMA	AsB	AsC	iAs	iAs 占比/%
金针菇	0.1032	0.0237	0.0106	0.0364	0.0546	N	0.1269	36.47
杏鲍菇	0.1767	0.0091	N	0.0988	0.1147	0.0148	0.1858	38.63
黄菇	0.2204	0.0171	N	0.0379	0.0899	N	0.2375	58.07
猪肚菇	0.0284	0.0142	N	0.0195	N	N	0.0426	25.62
草菇	0.0142	0.0071	0.0057	0.0842	0.0105	0.0251	0.0213	13.98
香菇	0.0314	0.0098	0.0028	0.0045	0.0027	0.0011	0.0412	74.10
鹿茸菇	0.0115	0.0011	N	0.0109	0.0045	0.0009	0.0126	27.75
赤松茸	0.0100	0.0029	0.0019	0.0470	0.0278	0.0006	0.0129	7.94
黑皮鸡枞菌	0.0166	0.0427	0.0021	0.0148	0.0026	0.0011	0.0593	26.80
毛木耳	0.0111	0.0008	N	0.0082	0.0046	N	0.0119	14.18
黑木耳	0.0123	0.0095	N	0.0055	0.0047	0.0038	0.0218	39.49
双孢菇	0.0118	0.0066	0.002	0.0462	0.3544	0.0013	0.0184	4.11
平菇	0.2558	0.1610	0.0052	0.0005	0.0009	0.0006	0.4168	90.04
姬松茸	0.0120	0.0091	0.1549	0.0097	0.4800	0.0007	0.0211	2.83
羊肚菌	0.0408	0.0182	0.0025	0.0017	0.0013	0.0011	0.0590	51.17
竹荪	0.0101	0.0027	N	0.0282	0.0202	0.0004	0.0128	12.19
猴头菇	0.0127	0.0013	0.002	0.0035	0.0013	0.0004	0.0140	57.14
金耳	0.0215	0.0047	N	0.0082	0.0016	0.0046	0.0262	57.08
平均值	0.0556	0.0190	0.0105	0.0259	0.0654	0.0031	0.0746	40.45

注: N 表示低于检出限，表 3 同。

的含量降至 0~0.1138 mg/kg, 生物可给性在 0.00%~70.42%之间, 呈现明显的两极分化特点。猪肚菇、毛木耳、猴头菇、草菇、鹿茸菇、竹荪、赤松茸等品种的 iAs 生物可给性均高于 55%, 这类菌肉质结构较为疏松, 消化液更易渗透并释放结合态砷; 黑皮鸡枞菌、平菇、羊肚菌的生物可给性低于 25%; 而双孢菇和姬松茸的 iAs 生物可给性为 0, 即在整个消化过程中均未检出 iAs 形态。从消化阶段的形态变化来看, As(V)在所有品种的胃阶段和肠阶段均未检出, AsC 仅在少数品种中微量检出, 说明消化过程会驱动砷形态发生定向转化。在胃阶段, 强酸性环境能够有效破坏砷与蛋白质、多糖等基质组分的结合键, 促进砷的溶出与释放; 进入肠阶段后, 环境转为中性或弱碱性, 食用菌中的膳食纤维与蛋白质可通过螯合、吸附作用重新结合部分 iAs, 使溶解态 iAs 浓度有所下降。由此可见, 胃肠 pH 变化、食物基质组成共同调控砷的释放与形态转化, 而生物可给性能够更真实地反映人体可吸收的砷剂量, 是健康风险评估中不可或缺的校正参数。

表 3　消化液中砷形态分布

Table 3　Distribution of arsenic species in digestive fluid

编号	消化阶段	As(III)/(mg/kg)	As(V)/(mg/kg)	MMA/(mg/kg)	DMA/(mg/kg)	AsB/(mg/kg)	AsC/(mg/kg)	iAs/(mg/kg)	iAs 的生物可给性/%
金针菇	胃阶段	0.0216	N	0.0074	N	0.0372	N	0.0470	37.04
	肠阶段	0.0254	N	N	N	N	N		
杏鲍菇	胃阶段	0.0514	N	N	0.0071	0.1250	N	0.0878	47.26
	肠阶段	0.0364	N	N	N	N	N		
黄菇	胃阶段	0.0560	N	N	N	0.1542	N	0.1138	47.92
	肠阶段	0.0578	N	N	N	0.0091	0.0069		
猪肚菇	胃阶段	0.0069	N	0.0039	0.0047	0.0398	N	0.0100	70.42
	肠阶段	0.0031	N	0.0126	N	N	N		
草菇	胃阶段	0.0050	N	N	0.0242	0.0233	N	0.0087	61.27
	肠阶段	0.0037	N	N	0.0008	0.0008	N		
香菇	胃阶段	0.0084	N	N	0.0013	0.0026	N	0.0133	32.28
	肠阶段	0.0049	N	0.0008	0.0002	0.0001	N		
鹿茸菇	胃阶段	0.0038	N	N	0.0009	0.0020	N	0.0077	61.11
	肠阶段	0.0039	N	0.0007	0.0017	0.0007	N		
赤松茸	胃阶段	0.0039	N	N	0.0141	0.0095	N	0.0076	58.91
	肠阶段	0.0037	N	0.0007	0.0040	0.0020	N		
黑皮鸡枞菌	胃阶段	0.0052	N	N	0.0041	0.0015	N	0.0105	17.71
	肠阶段	0.0053	N	0.0007	0.0010	0.0001	N		
毛木耳	胃阶段	0.0041	N	N	0.0002	0.0011	N	0.0079	66.39
	肠阶段	0.0038	N	0.0007	N	N	N		
黑木耳	胃阶段	0.0043	N	0.0007	N	0.0011	N	0.0084	38.53
	肠阶段	0.0041	N	0.0008	N	0.0001	N		
双孢菇	胃阶段	N	N	N	0.0098	0.0892	0.0001	/	/
	肠阶段	N	N	N	0.0058	0.0562	0.0001		
平菇	胃阶段	0.0484	N	0.0007	N	0.0011	0.0001	0.0774	18.57
	肠阶段	0.0290	N	N	N	0.0003	N		
姬松茸	胃阶段	N	N	N	0.0022	0.1187	N	N	0.00
	肠阶段	N	N	N	0.0009	0.0487	N		
羊肚菌	胃阶段	0.0055	N	0.0008	0.0001	0.0011	N	0.0134	22.71
	肠阶段	0.0079	N	0.0009	0.0009	0.0004	N		
竹荪	胃阶段	0.0040	N	N	0.0067	0.0105	N	0.0078	60.94
	肠阶段	0.0038	N	0.0007	0.0013	0.0025	0.0001		
猴头菇	胃阶段	0.0047	N	N	0.0008	0.0009	N	0.0089	63.57
	肠阶段	0.0042	N	0.0008	0.0003	0.0005	N		
金耳	胃阶段	0.0044	N	N	N	0.0001	N	0.0090	34.35
	肠阶段	0.0046	N	0.0008	0.0002	N	N		

注: /表示无, 表 4 同。

2.4 样品中 TAs、样品中 iAs 与体外消化液中 iAs 的健康风险评估结果

表 4 展示了 18 种食用菌中 TAs、样品中 iAs 及消化液中 iAs 的 EDI、THQ、TCR 风险评估结果, 结果表明, 不同食用菌的砷暴露风险特征存在明显差异。在 EDI 评估结果中, TAs(样品)的 EDI 范围为 0.0305(猴头菇)~0.9279 mg/(kg • d)(姬松茸), 其中姬松茸、平菇、杏鲍菇的暴露水平相对较高; iAs(样品)的 EDI 范围为 0.0148(毛木耳)~0.5186 mg/(kg • d)(平菇), 平菇的 iAs 摄入风险明显高于其他样品, 而毛木耳、鹿茸菇、竹荪的 iAs 摄入水平最低。进一步分析 iAs(消化液)发现, 其 EDI 范围为 0.0095(赤松茸)~0.1416 mg/(kg • d)(黄菇), 其中黄菇、平菇的 EDI 相对突出; 而双孢菇和姬松茸则未检出。在 THQ 层面, iAs(样品)的 THQ 差异明显, 范围为 0.0494(毛木耳)~1.7286(平菇), 仅平菇的 THQ>1, 提示其 iAs(样品)可能存在潜在非致癌风险, 其余样品 THQ 均小于 1, 风险处于可接受范围; iAs(消化液)的 THQ 范围为 0.0315(赤松茸)~0.4720(黄菇), 整体均小于 1, 结合消化阶段数据来看, 黄菇、平菇的消化液中 THQ (iAs)相对较高, 需重点关注其消化过程中的砷暴露风险。TCR 方面, iAs(样品)的 TCR 值处于 10^{-5}~10^{-4} 数量级, 范围为 2.22×10^{-5}(毛木耳)~7.78×10^{-4}(平菇), 黄菇、金针菇、香菇、平菇的 TCR 明显高于其他样品; iAs(消化液)的 TCR 同样处于低数量级, 范围为 1.42×10^{-5}(赤松茸)~香菇 2.12×10^{-4}(黄菇)。整体而言, 经过胃肠消化与生物可给性校正后, 风险水平大幅下降; 致癌风险等级由高风险区间回落至低风险区间; 暴露风险得到显著削减。

食用菌中砷形态含量的显著差异, 主要由品种自身砷代谢与解毒能力决定; 而iAs生物可给性的高低, 则更多受基质组成、胃肠 pH 梯度、蛋白质与膳食纤维螯合作用共同调控。食用菌富含的蛋白质与膳食纤维, 可在肠道弱碱性环境下与 iAs 形成稳定络合物, 抑制其溶出与吸收, 这一规律与国内外在蔬菜、贝类等食物中得到的研究结论一致[30–31]。

表 4 样品中 TAs、样品中 iAs 与体外消化液中 iAsa 的健康风险评估结果

Table 4 Health risk assessment results of TAs in the samples, iAs in the samples and iAs in the *in vitro* digestion liquid

	EDI/[mg/(kg•d)]			THQ		TCR	
编号	样品 TAs	样品 iAs	消化液 iAs	样品 iAs	消化液 iAs	样品 iAs	消化液 iAs
金针菇	0.4330	0.1579	0.0585	0.5263	0.1949	2.37×10^{-4}	8.77×10^{-5}
杏鲍菇	0.5984	0.2312	0.1092	0.7706	0.3641	3.47×10^{-4}	1.64×10^{-4}
黄菇	0.5089	0.2955	0.1416	0.9850	0.4720	4.43×10^{-4}	2.12×10^{-4}
猪肚菇	0.2069	0.0177	0.0435	0.0589	0.1452	2.65×10^{-5}	6.53×10^{-5}
草菇	0.1896	0.0177	0.0108	0.0589	0.0361	2.65×10^{-5}	1.62×10^{-5}
香菇	0.0692	0.0513	0.0165	0.1709	0.0552	7.69×10^{-5}	2.48×10^{-5}
鹿茸菇	0.0565	0.0157	0.0096	0.0523	0.0319	2.35×10^{-5}	1.44×10^{-5}
赤松茸	0.2021	0.0160	0.0095	0.0535	0.0315	2.41×10^{-5}	1.42×10^{-5}
黑皮鸡枞菌	0.2753	0.0738	0.0131	0.2459	0.0435	1.11×10^{-4}	1.96×10^{-5}
毛木耳	0.1044	0.0148	0.0098	0.0494	0.0328	2.22×10^{-5}	1.47×10^{-5}
黑木耳	0.0687	0.0271	0.0105	0.0904	0.0348	4.07×10^{-5}	1.57×10^{-5}
双孢菇	0.5570	0.0229	/	0.0763	/	3.43×10^{-5}	/
平菇	0.5759	0.5186	0.0963	1.7286	0.3210	7.78×10^{-4}	1.44×10^{-4}
姬松茸	0.9279	0.0263	/	0.0875	/	3.94×10^{-5}	/
羊肚菌	0.1435	0.0734	0.0167	0.2447	0.0556	1.10×10^{-4}	2.50×10^{-5}
竹荪	0.1306	0.0159	0.0097	0.0531	0.0323	2.39×10^{-5}	1.46×10^{-5}
猴头菇	0.0305	0.0174	0.0111	0.0581	0.0369	2.61×10^{-5}	1.66×10^{-5}
金耳	0.0571	0.0326	0.0112	0.1087	0.0373	4.89×10^{-5}	1.68×10^{-5}

3 结　论

本研究以贵州省 18 种常见食用菌为研究对象，系统测定其 TAs 含量、不同化学形态砷组分分布特征，通过体外模拟胃肠消化试验解析砷在消化过程中的溶出规律与生物可给性，并基于可给态砷完成膳食砷暴露健康风险定量评估。结果表明：砷形态与消化过程生物可给性共同决定食用菌砷真实暴露风险，仅依靠原样总砷或无机砷开展评估易出现风险误判，同步结合砷形态与体外消化校正可显著提升风险评估准确度。本研究实测数据可为贵州省食用菌产地重金属污染源头管控、区域食用菌食品安全常态化监测、地方食用菌砷限量标准细化完善提供基础试验依据与技术支撑。后续可进一步探究家庭常规烹饪方式对食用菌砷形态稳定性、生物可给性的影响；构建从原料到餐桌的全链条膳食砷风险评估体系。

参考文献

[1] 刘正华. 食用林产品中砷汞硒形态分析技术研究[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2024: 36–48.
Liu Zhenghua. Research and application of arsenic, mercury, and selenium speciation analysis technology in edible forest products [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2024: 36–48.

[2] Syu C H, Huang C C, Jiang Peiyu, et al. Arsenic accumulation and speciation in rice grains influenced by arsenic phytotoxicity and rice genotypes grown in arsenic-elevated paddy soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 286: 179–186.

[3] Fang Yong, Sun Xinyang, Yang Wenjian, 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.

[4] Kuo C C, Moon K A, Wang Shuli, et al. The association of arsenic metabolism with cancer, cardiovascular disease, and diabetes: a systematic review of the epidemiological evidence [J]. Environmental Health Perspectives, 2017, 125(8): 087001.

[5] Chen Shuangyang, Yuan Biao, Xu Jiajia, et al. Simultaneous separation and determination of six arsenic species in Shiitake (*Lentinus edodes*) mushrooms: method development and applications [J]. Food Chemistry, 2018, 262: 134–141.

[6] Falandysz J, Drewnowska M, Chudzińska M, et al. Accumulation and distribution of metallic elements and metalloids in edible *Amanita fulva* mushrooms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 137: 265–271.

[7] Zhang Ji, Li Tao, Yang Yali, et al. Arsenic concentrations and associated health risks in *Laccaria* Mushrooms from Yunnan (SW China) [J]. Biological Trace Element Research, 2015, 164(2): 261–266.

[8] Zou Haimin, Zhou Chen, Li Yongxin, et al. Speciation analysis of arsenic in edible mushrooms by high-performance liquid chromatography hyphenated to inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2020, 327: 127033.

[9] López A R, Ortega-Caneda E, Espada-Bellido E, et al. Decoding trace element speciation in mushrooms: analytical techniques, comprehensive data review, and health implications [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141460.

[10] Barea-Sepúlveda M, Espada-Bellido E, Ferreiro-González M, et al. Toxic elements and trace elements in *Macrolepiota procera* mushrooms from southern Spain and northern Morocco [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 108: 104419.

[11] 闻剑, 杨晓东, 尼珍, 等. 西藏林芝地区野生食用菌重金属污染状况调查及其暴露评估[J]. 中国热带医学, 2018, 18(9): 881–883.
Wen Jian, Yang Xiaodong, Nizhen, et al. Survey of heavy metal pollution and potential risks to human health of wild edible mushrooms in Linzhi Prefecture of Tibet [J]. China Tropical Medicine, 2018, 18(9): 881–883.

[12] 付洁, 孙洪欣, 张敏, 等. 市售食用菌中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 230–237.
Fu Jie, Sun Hongxin, Zhang Min, et al. Heavy metal's concentrations characteristics and risk assessment of edible mushrooms [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(6): 230–237.

[13] 黄明晋. 食品中金属元素形态分析技术及应用探讨[J]. 中国食品工业, 2021(17): 55–56, 59.
Huang Mingjin. Discussion on speciation analysis technology and application of metal elements in food [J]. China Food Industry, 2021(17): 55–56, 59.

[14] Li Mengying, Chen Zheng, Xiong Qing, et al. Refining health risk assessment of arsenic in wild edible *Boletus* from typical high geochemical background areas: the role of as species, bioavailability, and enterotoxicity [J]. Environmental Pollution, 2023, 334: 122148.

[15] Llorente-Mirandes T, Llorens-Muñoz M, Funes-Collado V, et al. Assessment of arsenic bioaccessibility in raw and cooked edible mushrooms by a PBET method [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 849–856.

[16] Roy M, McDonald L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils [J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(8): 785–792.

[17] Zhang Rui, Chen Tao, Zhang Yu, et al. Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils and identification of main influencing factors in a typical industrial park in northwest China [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126591.

[18] Zheng Shunan, Wang Qi, Yuan Yuzhi, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China [J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126213.

[19] Mehta N, Cocerva T, Cipullo S, et al. Linking oral bioaccessibility and solid phase distribution of potentially toxic elements in extractive waste and soil from an abandoned mine site: case study in Campello Monti, NW Italy [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2799–2810.

[20] El Nemr A, El-Said G F, Ragab S, et al. The distribution, contamination and risk assessment of heavy metals in sediment and shellfish from the

Red Sea coast, Egypt [J]. Chemosphere, 2016, 165: 369–380.

[21] Wang Pengfei, Yin Naiyi, Cai Xiaolin, et al. Variability of chromium bioaccessibility and speciation in vegetables: the influence of *in vitro* methods, gut microbiota and vegetable species [J]. Food Chemistry, 2019, 277: 347–352.

[22] Liao Wen, Wang Guang, Li Kaiming, et al. Change of arsenic speciation in shellfish after cooking and gastrointestinal digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(29): 7805–7814.

[23] Le T T, Kim K W, Nguyen D Q, et al. Trace element contamination in rice and its potential health risks to consumers in North-Central Vietnam [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(6): 3361–3375.

[24] Kasozi K I, Hamira Y, Zirintunda G, et al. Descriptive analysis of heavy metals content of beef from eastern *Uganda* and their safety for public consumption [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 592340.

[25] 李冰茹, 张全刚, 姚真真, 等. 北京市售干食用菌中重金属特征分析及健康风险评价[J]. 现代食品科技, 2020, 36(12): 293–299, 319.
Li Bingru, Zhang Quangang, Yao Zhenzhen, et al. Analysis of heavy metals in dried edible fungi commercially available in Beijing and assessment of health risks *via* consumption [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 293–299, 319.

[26] 丁玲, 别运清, 应正河. 姬松茸对四种重金属的富集能力及其培养基质重金属的临界值[J]. 中南农业科技, 2023, 44(11): 28–31.
Ding Ling, Bie Yunqing, Ying Zhenghe. Enrichment ability of *Agaricus blazei* Murill for four heavy metals and critical value of heavy metals in its culture medium [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023, 44(11): 28–31.

[27] 刘朋虎, 雷锦桂, 王义祥, 等. 食用菌富集重金属主要特征与相关机制研究进展[J]. 热带作物学报, 2017, 38(12): 2407–2414.
Liu Penghu, Lei Jingui, Wang Yixiang, et al. Advances in research on characteristics and related mechanisms of heavy metal enrichment by edible fungi [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(12): 2407–2414.

[28] 陈双阳, 陈贵堂, 胡秋辉, 等. 市售食用菌中砷的形态分析以及健康风险评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 180–188.
Chen Shuangyang, Chen Guitang, Hu Qiuhui, et al. Speciation analysis and health risk assessment of arsenic in commercial edible mushrooms [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 180–188.

[29] 唐庆强, 曹晓钢, 夏林兵, 等. As(III)和 As(V)在香菇栽培基质和子实体中的迁移规律[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 94–99.
Tang Qingqiang, Cao Xiaogang, Xia Linbing, et al. Absorption and accumulation of As(III) and As(V) in *Lentinus edodes* fruit bodies from culture medium [J]. Food Science, 2019, 40(21): 94–99.

[30] 张洁, 陈海华, 王雨生, 等. 体外模拟消化过程中食物成分对三价无机砷生物可给性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 66–72.
Zhang Jie, Chen Haihua, Wang Yusheng, et al. Effects of food components on bioaccessibility of trivalent inorganic arsenic during *in vitro* simulated digestion [J]. Food Science, 2019, 40 (18): 66–72.

[31] 王艳, 赵艳芳, 康绪明, 等. 基于体外消化模型的虾夷扇贝中砷形态生物可给性研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(4): 461–467.
Wang Yan, Zhao Yanfang, Kang Xuming, et al. Study on arsenic species bioaccessibility of yesso scallop based on *in vitro* digestion model [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(4): 461–467.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)