

冬虫夏草繁育品中重金属及有害元素分布特征研究及风险评估

李耀磊¹, 李海亮¹, 咎珂¹, 左甜甜¹, 王莹¹, 钱正明², 李文佳², 金红宇^{1*}, 马双成^{1*} (1. 中国食品药品检定研究院, 北京 102629; 2. 东莞市东阳光冬虫夏草研发有限公司, 东莞 523850)

摘要 目的: 对冬虫夏草繁育品干品和鲜品中重金属及有害元素分布特征进行研究, 以期为无公害冬虫夏草的繁育提供技术支持。方法: 采用微波消解法对干品和鲜品样品进行有机破坏处理, 以ICP-MS法为检测方法, 对干品和鲜品共30批次的样品中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu) 5种重金属及有害元素进行测定, 结合化学计量学对测定结果的含量特征进行分析; 结合课题组前期建立的风险评估方法(HI或MOE法)从食用及药用两方面对分析结果进行风险评估。结果: 分析过程中各元素在线性范围内线性关系良好, 进样精密度的RSD在0.34%~0.79%之间, 各元素的回收率在93.0%~103.0%之间。30批次样品中, Cu、Cd全部检出, 含量范围分别是2.1~8.98 mg·kg⁻¹和0.02~0.25 mg·kg⁻¹; As有26批检出, 含量范围是0.10~0.48 mg·kg⁻¹; Pb有16批检出, 含量范围是0.10~0.50 mg·kg⁻¹; Hg仅有4批检出, 含量范围是0.02~0.05 mg·kg⁻¹。主成分分析及聚类分析结果表明, 干品和鲜品重金属及有害元素含量特征具有明显的区别; 风险评估结果表明, Cu、Cd、Hg元素的HI<1, Pb、As元素的MOE>1, 干品和鲜品中重金属及有害元素潜在的健康风险均较低。结论: 本研究为繁育无公害且低含量重金属及有害元素的冬虫夏草和其质量标准的完善具有一定的指导作用。

关键词: 冬虫夏草; 重金属及有害元素; 电感耦合等离子体质谱; 微波消解; 风险评估

中图分类号: R932 文献标识码: A 文章编号: 1002-7777(2023)10-1120-09

doi:10.16153/j.1002-7777.2023.10.004

Study on the Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals and Harmful Elements in the Breeding Products of *Cordyceps sinensis*

Li Yaolei¹, Li Hailiang¹, Zan Ke¹, Zuo Tiantian¹, Wang Ying¹, Qian Zhengming², Li Wenjia², Jin Hongyu^{1*}, Ma Shuangcheng^{1*} (1. National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 102629, China; 2. Dongguan Dongyanguang Cordyceps R&D Co., Ltd., Dongguan 523850, China)

Abstract Objective: Research on the distribution characteristics of heavy metals and harmful elements in dry and fresh products of *Cordyceps sinensis* breeding products, in order to provide technical support for the breeding of pollution-free *Cordyceps sinensis*. **Method:** The microwave digestion method was used to

基金项目: 科技部重大新药创制(编号 2018ZX09303-024; 2018ZX09735-006); 国家重点研发计划(编号 2022YFC3501505)

作者简介: 李耀磊 Tel: (010) 53852464; E-mail: 987076273@qq.com

通信作者: 金红宇 Tel: (010) 53851413; E-mail: jhyu@nifdc.org.cn

马双成 Tel: (010) 67095272; E-mail: masc@nifdc.org.cn

organically destroy the dry and fresh samples, and the ICP-MS method was used to detect the five kinds of heavy metals and harmful elements including lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), mercury (Hg), and copper (Cu) in 30 batches of dry and fresh samples, and the content characteristics of the determination results were analyzed in combination with chemometrics; combined with the risk assessment method (HI or MOE) established by the research group in the early stage, and analyzed the results for risk assessment from two aspects of food consumption and medicinal use. **Result:** During the analysis process, the elements have a good linear relationship within the linear range, the injection precision RSD was between 0.34%-0.79%, and the recovery rate of each element was between 93.0%-103.0%. In 30 batches of samples, Cu and Cd were all detected, with the content range of 2.1-8.98 mg·kg⁻¹ and 0.02-0.25 mg·kg⁻¹, respectively; as was detected in 26 batches, with the content range of 0.10-0.48 mg·kg⁻¹; Pb was detected in 16 batches, with the content range of 0.10-0.50 mg·kg⁻¹; Hg was only detected in 4 batches, with the content range of 0.02-0.05 mg·kg⁻¹. The results of principal component analysis and cluster analysis showed that there were obvious differences in the characteristics of heavy metals and harmful elements in dry and fresh products; the risk assessment results showed that the HI of the Cu, Cd, Hg was less than 1, and the MOE of the Pb and As elements was more than 1. The potential health risks of heavy metals and harmful elements in dry and fresh products were relatively low. **Conclusion:** This research has a certain guiding role for the breeding of *Cordyceps sinensis* with no pollution and low content of heavy metals and harmful elements and the improvement of its quality standards. **Keywords:** *Cordyceps sinensis*; heavy metals and harmful elements; ICP-MS; microwave-assisted digestion; risk assessment

中药中重金属及有害元素的含量分析不仅关乎中药质量评价,同时也关乎临床用药安全。中药中重金属及有害元素的污染与其环境密切相关,因此,如何进行无公害且低含量重金属及有害元素的中药材的人工繁育成为新的研究方向。冬虫夏草为2020年版《中华人民共和国药典》(以下简称《中国药典》)收录的中药品种^[1],同时也是我国名贵的中药之一。近年来,大量的研究表明,野生冬虫夏草中砷元素含量普遍较高^[2-3],也有研究者对其生长环境进行检测研究,发现重金属及有害元素与环境中的土壤密切相关^[4]。与此同时,另有研究者进行了大量的无公害冬虫夏草的繁育研究^[5-8]。由于药材中重金属及有害元素与药材产地、加工方法、储藏条件密切相关,中药材繁育品能够着重关注这些影响因素,从而有效地避免外源性有害物质的污染。生态繁育的冬虫夏草有干品和鲜品,目前相关研究中,干品和鲜品中重金属及有害元素的对比分析少有研究。本文基于上述研究背景,采用微波辅助消解对冬虫夏草繁育品中干品和鲜品进行

有机破坏处理,采用ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)法对干品和鲜品共30批次的样品中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)5种重金属及有害元素进行测定,结合化学计量学对测定结果的含量特征进行分析,并对分析结果进行风险评估,以期为无公害冬虫夏草的繁育提供数据支撑。

1 仪器和材料

电感耦合等离子体质谱(ICPMS,安捷伦公司,7700X),微波消解系统(CEM公司,MARS 5),赶酸仪(CEM公司),Milli-Q系统(Millipore公司),电子天平(型号XS 105DU)。

硝酸(微电子级,Fisher公司),水,Pb、Cd、As、Hg、Cu混合对照品(中国食品药品检定研究院,批号610014-201701),调谐液(安捷伦公司,批号5185-5959),内标溶液(安捷伦公司,批号5188-6525);冬虫夏草繁育品干品和鲜品各15批次,由东莞市东阳光冬虫夏草研发有限公司提供,样品批次、采集时间及采集地见表1。

表1 样品信息

编号	样品批次	采集日期	采集地	编号	样品批次	采集日期	采集地
1	冬虫夏草(繁育品)干品-1	2020.06.24	湖北宜都	16	冬虫夏草(繁育品)鲜品-1	2020.06.08	湖北宜都
2	冬虫夏草(繁育品)干品-2	2020.06.16	湖北宜都	17	冬虫夏草(繁育品)鲜品-2	2020.06.04	湖北宜都
3	冬虫夏草(繁育品)干品-3	2020.05.31	湖北宜都	18	冬虫夏草(繁育品)鲜品-3	2020.06.03	湖北宜都
4	冬虫夏草(繁育品)干品-4	2020.05.22	湖北宜都	19	冬虫夏草(繁育品)鲜品-4	2020.01.02	广东东莞
5	冬虫夏草(繁育品)干品-5	2020.04.14	湖北宜都	20	冬虫夏草(繁育品)鲜品-5	2020.01.01	湖北宜都
6	冬虫夏草(繁育品)干品-6	2019.10.23	湖北宜都	21	冬虫夏草(繁育品)鲜品-6	2019.12.31	湖北宜都
7	冬虫夏草(繁育品)干品-7	2019.09.26	湖北宜都	22	冬虫夏草(繁育品)鲜品-7	2019.12.30	湖北宜都
8	冬虫夏草(繁育品)干品-8	2019.01.23	湖北宜都	23	冬虫夏草(繁育品)鲜品-8	2019.12.27	湖北宜都
9	冬虫夏草(繁育品)干品-9	2018.08.24	广东东莞	24	冬虫夏草(繁育品)鲜品-9	2019.12.26	湖北宜都
10	冬虫夏草(繁育品)干品-10	2018.06.17	广东东莞	25	冬虫夏草(繁育品)鲜品-10	2019.12.25	广东东莞
11	冬虫夏草(繁育品)干品-11	2018.05.11	湖北宜都	26	冬虫夏草(繁育品)鲜品-11	2019.12.20	湖北宜都
12	冬虫夏草(繁育品)干品-12	2018.03.16	湖北宜都	27	冬虫夏草(繁育品)鲜品-12	2019.12.19	湖北宜都
13	冬虫夏草(繁育品)干品-13	2017.08.31	湖北宜都	28	冬虫夏草(繁育品)鲜品-13	2019.12.18	湖北宜都
14	冬虫夏草(繁育品)干品-14	2017.08.25	湖北宜都	29	冬虫夏草(繁育品)鲜品-14	2019.12.17	湖北宜都
15	冬虫夏草(繁育品)干品-15	2017.08.17	湖北宜都	30	冬虫夏草(繁育品)鲜品-15	2019.12.16	湖北宜都

2 方法

2.1 检测方法

中药中重金属及有害元素的检测方法较为成熟,本研究采用《中国药典》2020年版四部通则2321法(电感耦合等离子体质谱法)对冬虫夏草繁育品进行检测^[1],检测过程中对方法的线性关系、精密度及随行回收率进行控制监测,以确保检测结果的准确性。

2.2 风险评估方法

风险评估的基本步骤包括危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险描述4个步骤。本课题组经过前期大量的研究,建立了中药中外源性有害残留物安全风险评估技术指导原则,主要基于危害系数(Hazard Index, HI)法和暴露限值(Margin Of Effect, MOE)法进行风险评估^[9]。本研究基于食品及药品2个角度探讨冬虫夏草繁育品中5种重金属及

有害元素的风险。

2.2.1 危害识别和危害特征描述

Pb、Cd、As、Hg 是公认的重金属及有害元素，可导致蓄积性中毒。Cu 虽然是人体必需的微量元素，但是过量的Cu可引起肝、肾、脑的损害。联合国粮食及农业组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会（Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA）规定Cd的暂定每月耐受摄入量（Provisional Tolerable Monthly Intake, PTMI）为0.025 mg · kg⁻¹，无机汞的暂定每周耐受摄入量（Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI）为 4 μg · kg⁻¹，铜的理论最大日摄入量（Provisional Maximum Tolerable Daily Intake, PMTDI）为 0.05~0.50 mg · kg⁻¹（本研究采纳 0.50 mg · kg⁻¹）。由于JECFA 取消了铅和无机砷的PTWI，本研究分别采纳世界卫生组织提出的无机砷导致肺癌发病率比本底值增长0.5%的每日基准剂量下限值（Bench Mark Dose Limit, BMDL_{0.5}）3.0 μg · kg⁻¹和成年人心血管效应毒性终点收缩压基准剂量下限值（BMDL₀₁）1.3 μg · kg^{-1[9-11]}。

2.2.2 暴露评估

冬虫夏草繁育品中重金属及有害元素暴露量（Exp）参照公式：

$$Exp = \frac{C \times IR}{W} \dots\dots\dots (1)$$

$$Exp = \frac{EF \times Ed \times IR \times C}{AT \times W} \dots\dots\dots (2)$$

公式（1）基于膳食风险评估模型进行风险评估，公式（2）基于中药的使用角度进行风险评估。公式中，Exp 为日暴露量，以每千克体质量每日重金属摄入量表示，单位为 μg · kg⁻¹；EF（Exposure Frequency）为暴露频率，指每年暴露于冬虫夏草繁育品中重金属的天数；Ed（Exposure Duration）为暴露年限，指暴露于冬虫夏草繁育品中重金属的年限；IR（Intake Recommendation）为冬虫夏草繁育品日最大摄入量，单位为 g；C为样品中重金属及有害元素残留值，单位为 mg · kg⁻¹；AT（Average Exposure Time）为平均寿命天数，以 365 × 70 年计；W为人体平均体质量，以 63 kg

计。冬虫夏草繁育品使用方式为口服，日最大摄入量IR为9 g，基于冬虫夏草繁育品使用信息，暂定其中EF为30天/年，Ed为30年。

2.2.3 风险描述

采用危害系数（HI）法对于Cd、Hg、Cu进行风险特征描述，采用暴露限值（MOE）法对于Pb和As进行风险特征描述，计算公式如下：

$$HI = Exp \times \frac{t}{HBGV} \dots\dots\dots (3)$$

$$MOE = \frac{BMDL}{Exp \times t} \dots\dots\dots (4)$$

公式（3）（4）中，t为安全因子，如果以冬虫夏草繁育品为食品进行评估，则t=1；如果以冬虫夏草繁育品为药品进行评估，则t表示每日由中药摄取的重金属量不大于日总暴露量（包括食物和饮用水）的10%^[1]。健康指导值（Health Based Guidance Values, HBGV）为重金属及有害元素的健康指导值（μg · kg⁻¹）。BMDL为重金属及有害元素的基准剂量下限（μg · kg⁻¹）^[9-12]。

若HI ≤ 1，冬虫夏草繁育品中重金属及有害元素的健康风险较低；若HI > 1，风险应予以关注。若MOE > 1，冬虫夏草繁育品中重金属及有害元素的健康风险较低；若MOE ≤ 1，风险应予以关注^[9]。

2.3 统计分析

本研究采用Excel及Origin软件，对冬虫夏草繁育品干品及鲜品中重金属及有害元素的含量特征进行主成分分析及聚类分析，对风险评估结果进行统计分析。

3 结果与讨论

3.1 随行质量控制

本研究对分析过程中分析方法的线性关系、精密度及回收率进行随行质量控制，结果表明（表2），Pb、Cd、As、Hg、Cu 5种重金属及有害元素在质量浓度范围内线性关系良好，Pb、Cd、As、Hg、Cu进样精密度的RSD分别为0.53%、0.58%、0.79%、0.34%、0.71%，Pb、Cd、As、Hg、Cu的回收率分别为98.0%、102.1%、103.0%、93.0%、95.6%，表明方法准确性良好。

表2 随行质量控制

元素	线性方程	线性范围/(ng·mL ⁻¹)	相关系数	精密度/%	回收率/%
Cu	$y = 0.9684x + 2.3748$	10 ~ 500	0.9995	0.71	95.6
As	$y = 0.9815x + 0.0638$	1 ~ 50	0.9998	0.79	103.0
Cd	$y = 0.9677x + 1.1136$	0.1 ~ 5	0.9988	0.58	102.1
Hg	$y = 1.0189x - 0.0732$	0.1 ~ 5	0.9994	0.34	93.0
Pb	$y = 0.9918x + 2.8237$	2 ~ 100	0.9995	0.53	98.0

3.2 测定结果分析

3.2.1 干品与鲜品含量特征

按照《中国药典》2020年版四部通则2321法(电感耦合等离子体质谱法),冬虫夏草繁育品干品及鲜品重金属及有害元素测定结果见表3。30批次样品中,Cu、Cd全部检出,含量范围分别是2.1~8.98 mg·kg⁻¹和0.02~0.25 mg·kg⁻¹;As有26批检出,含量范围是0.10~0.48 mg·kg⁻¹;Pb有16批检出,含量范围是0.10~0.50 mg·kg⁻¹;Hg仅有4批检出,含量范围是0.02~0.05 mg·kg⁻¹。首先根据中国食品国标GB 2762-2017中重金属及有害元素限量标准,冬虫夏草繁育品干品及鲜品的As含量低于谷物和新鲜蔬菜(≤0.5 mg·kg⁻¹)的限量规定,Cd含量低于豆类(≤0.2 mg·kg⁻¹)及坚

果(≤0.5 mg·kg⁻¹)的限量,Hg含量低于新鲜蔬菜(≤0.01 mg·kg⁻¹)限量规定,Pb含量低于茶叶(≤5 mg·kg⁻¹)限量规定。此外,根据《WMT2-2004 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》中规定Cu限量≤20.0 mg·kg⁻¹、As限量≤2.0 mg·kg⁻¹、Cd限量≤0.3 mg·kg⁻¹、Hg限量≤0.2 mg·kg⁻¹、Pb限量≤5.0 mg·kg⁻¹,《T/CATCM 009-2019无公害繁育冬虫夏草药材及饮片重金属及有害元素的最大残留限量》中规定Cu限量≤20 mg·kg⁻¹、As限量≤1.0 mg·kg⁻¹、Cd限量≤0.3 mg·kg⁻¹、Hg限量≤0.2 mg·kg⁻¹、Pb限量≤2.0 mg·kg⁻¹,冬虫夏草繁育品干品及鲜品中重金属及有害元素均符合以上标准的限量规定。

表3 冬虫夏草繁育品中Cu、As、Cd、Hg、Pb的测定结果

样品编号	含量/(mg·kg ⁻¹)					样品编号	含量/(mg·kg ⁻¹)				
	Cu	As	Cd	Hg	Pb		Cu	As	Cd	Hg	Pb
1	8.98	0.40	0.19	0.05	0.36	16	2.2	0.12	0.09	ND	0.10
2	6.34	0.36	0.14	ND	0.22	17	2.4	ND	0.09	ND	ND
3	5.87	0.33	0.11	ND	0.17	18	2.1	ND	0.05	ND	ND
4	5.54	0.40	0.12	ND	0.18	19	3.0	0.12	0.03	ND	ND
5	5.62	0.34	0.10	ND	0.20	20	2.6	0.11	0.03	ND	ND
6	5.49	0.41	0.13	ND	0.21	21	4.8	0.21	0.10	ND	ND
7	5.05	0.37	0.18	ND	0.21	22	2.1	0.10	0.02	ND	ND
8	5.15	0.48	0.25	ND	0.50	23	2.8	0.12	0.05	ND	ND
9	5.84	0.45	0.12	0.02	0.35	24	3.1	0.11	0.07	ND	ND

续表 3

样品编号	含量 / (mg · kg ⁻¹)					样品编号	含量 / (mg · kg ⁻¹)				
	Cu	As	Cd	Hg	Pb		Cu	As	Cd	Hg	Pb
10	5.33	0.42	0.15	ND	0.27	25	2.5	0.11	0.02	0.02	ND
11	8.90	0.40	0.19	0.04	0.36	26	2.2	0.12	0.08	ND	ND
12	6.38	0.36	0.14	ND	0.22	27	2.4	ND	0.09	ND	ND
13	5.78	0.34	0.11	ND	0.17	28	2.1	ND	0.05	ND	ND
14	5.60	0.42	0.12	ND	0.18	29	3.1	0.13	0.03	ND	ND
15	5.54	0.35	0.10	ND	0.20	30	2.6	0.11	0.03	ND	ND

注：ND 表示未检出（报告限：As 0.1 mg · kg⁻¹，Hg 0.02 mg · kg⁻¹，Pb 0.1 mg · kg⁻¹）。

3.2.2 主成分分析

依据主成分分析法对冬虫夏草繁育品干品和鲜品的重金属及有害元素含量进行进一步分析 Cu、As、Cd、Hg、Pb 元素的特征，发现干品和鲜品具有明显的区别（见图1），得分较高的第一主成分（PC1）为75.4%，第二主成分（PC2）得分为

16.5%，第三主成分（PC3）得分为5.1%，3个主成分贡献率达97%，能够说明部分的变异信息。综合分析发现干品和鲜品距离较远，干品15批次样品能够明显地归为一类，鲜品同样能够归为一类。因此，主成分分析法可看出冬虫夏草繁育品干品和鲜品的重金属及有害元素具有显著的差异。

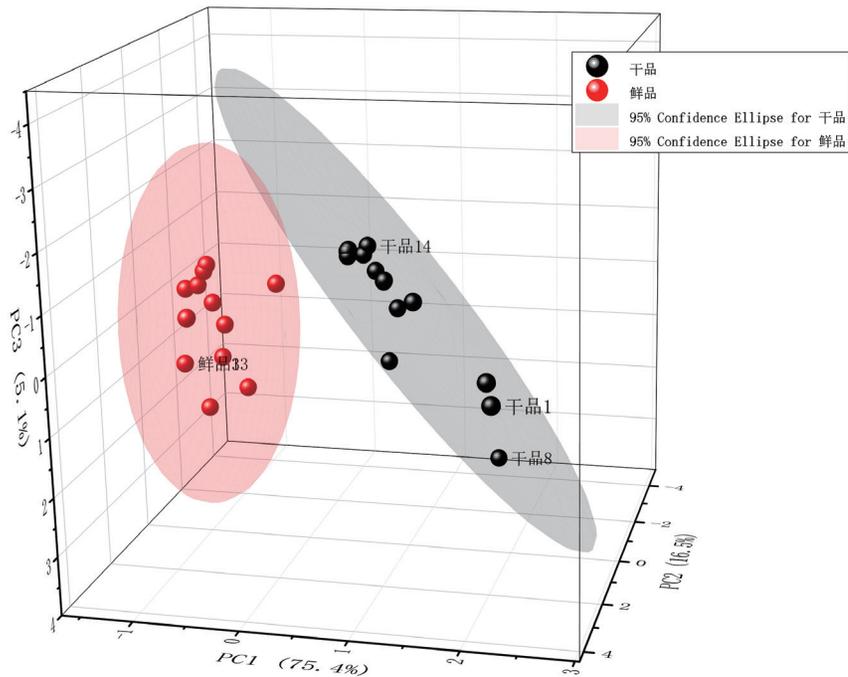


图1 主成分分析 3D 得分图

3.2.3 聚类分析

本研究同时采用Origin软件的聚类分析法,对冬虫夏草繁育品干品和鲜品的重金属及有害元素含量特征进行聚类分析。通过对建立聚类变量的设

置,结合多元线性回归和主成分分析的优势^[13-14],如图2所示,聚类分析能够将干品聚为一大类,鲜品聚为一大类,结果较为明显,与主成分分析法得出的结论一致。

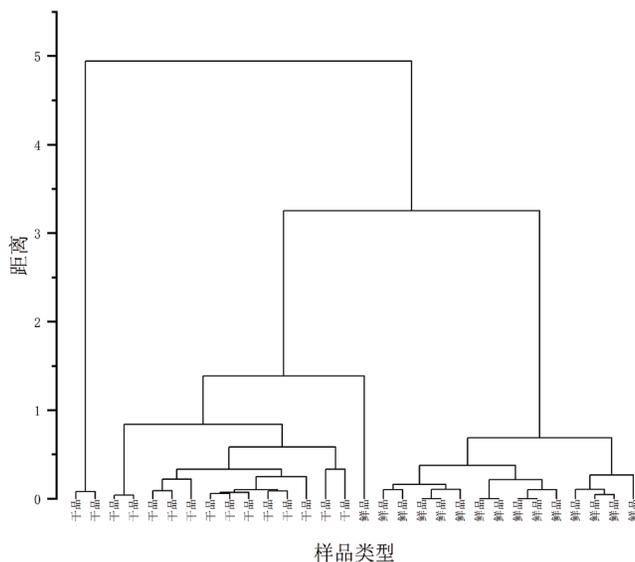


图2 聚类分析结果

3.3 风险评估

根据风险评估基本步骤,由“2.2”项方法计算出冬虫夏草繁育品干品及鲜品中Pb、Cd、As、Hg、Cu的日暴露量(见图3),进一步计算出Cd、Hg、Cu的HI(见图4)以及Pb和As的MOE(见图

5)。根据图4~图5结果,冬虫夏草繁育品干品及鲜品中Cu、Cd、Hg的HI均小于1,并且Pb和As的MOE均大于1,由此可见,无论作为食品或者药品使用,冬虫夏草繁育品干品及鲜品中重金属及有害元素对人体的健康风险均较低。

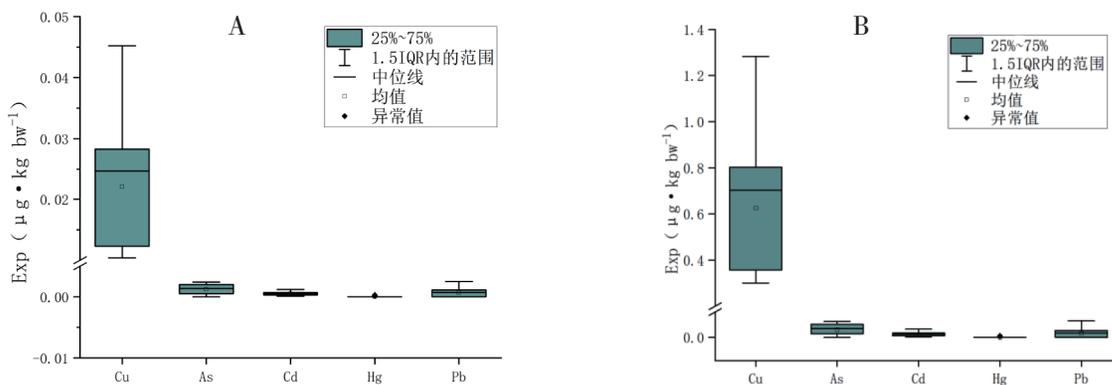


图3 日暴露量 Exp (A 为药用时 Exp, B 为食用时 Exp)

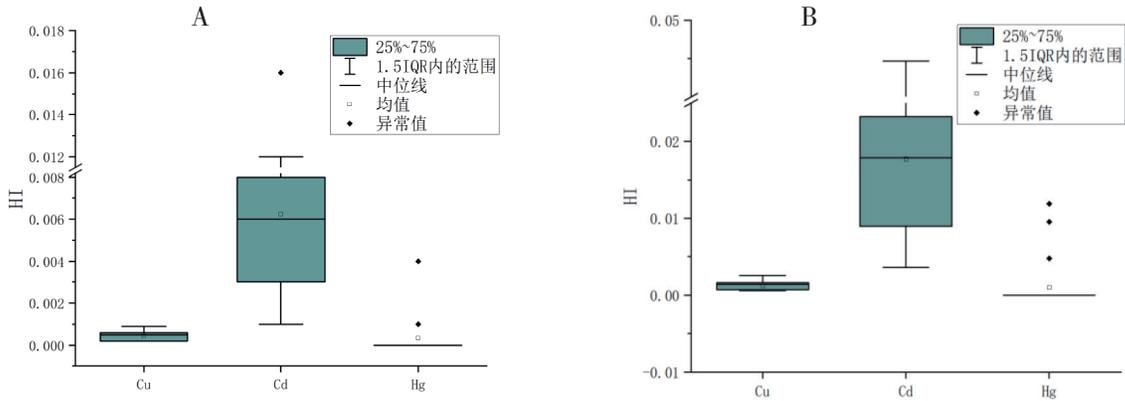


图4 危害系数 (A 为药用时 HI, B 为食用时 HI, HI 均小于 1)

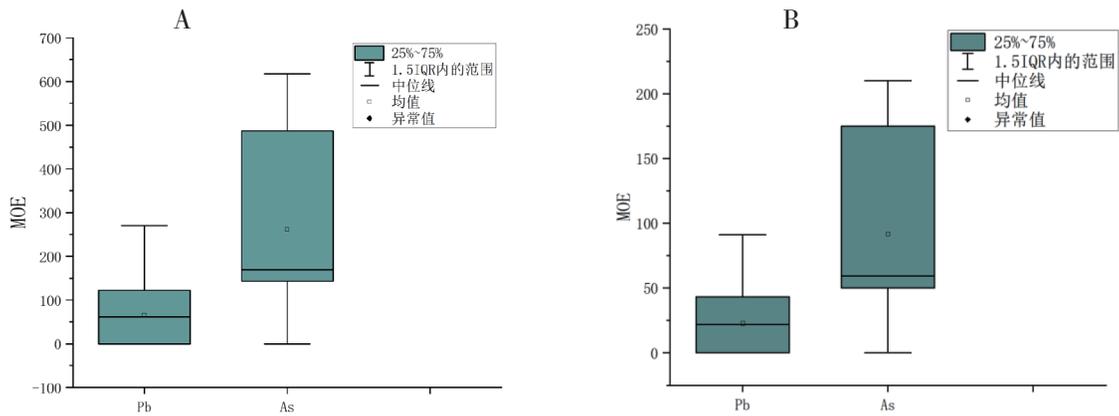


图5 暴露限值 (A 为药用时 MOE, B 为食用时 MOE, MOE 均大于 1)

4 结论

本文基于微波辅助消解结合ICP-MS的方法,首次对冬虫夏草繁育品中干品和鲜品中Pb、Cd、As、Hg、Cu、5种重金属及有害元素进行对比研究,结合化学计量学通过主成分分析及聚类分析法对干品和鲜品含量特征进行分析,发现二者元素含量特点明显,其可能受水分等因素影响;同时,风险评估结果表明,无论是干品或鲜品,5种元素潜在的健康风险均较低。本研究为无公害冬虫夏草的繁育和质量标准的完善提供数据支撑。

参考文献:

[1] 中华人民共和国药典:一部[S]. 2020.
 [2] 邵劲松, 胡耀娟, 刘苏莉, 等. 冬虫夏草中砷的形态分析与评价[J]. 分析科学学报, 2020, 36(2): 229-234.

[3] 李耀磊, 徐健, 金红宇, 等. 冬虫夏草及产区土壤中5种重金属及有害元素污染评价[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(4): 677-684.
 [4] 杨俐, 邓阳川, 苏燕燕, 等. 冬虫夏草产地土壤中耐砷细菌的分离、鉴定及耐砷能力测定[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2020, 22(7): 2563-2571.
 [5] 李文庆, 周建桥, 李文佳, 等. 冬虫夏草鲜品及干品游离氨基酸比较分析[J]. 菌物研究, 2020, 18(2): 126-131.
 [6] 笱珂, 钱正明, 李文佳, 等. 冬虫夏草繁育品质量控制和药理活性研究进展[J]. 中国药事, 2020, 34(4): 464-470.
 [7] 钱正明, 李文庆, 黄琦, 等. 鲜药质量评价研究进展[J]. 中国药业, 2019, 28(19): 14-17.
 [8] 钱正明, 孙敏甜, 周建桥, 等. 冬虫夏草不同生长阶段虫草酸含量比较分析[J]. 时珍国医国药, 2019, 30

- (5): 1103-1104.
- [9] 左甜甜, 王莹, 张磊, 等. 中药中外源性有害残留物安全风险评估技术指导原则[J]. 药物分析杂志, 2019, 39(10): 1902-1907.
- [10] 聂黎行, 钱秀玉, 蒋沁悦, 等. 中成药中重金属及有害元素残留分析、风险评估和限量制定建议[J]. 药学学报, 2020, 55(11): 2695-2701.
- [11] 聂黎行, 查祎凡, 左甜甜, 等. 基于ICP-MS和对照制剂的牛黄清胃丸中重金属及有害元素残留量测定及风险评估[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(1): 82-87.
- [12] 左甜甜, 张磊, 金红宇, 等. 中药材提取前后重金属及有害元素转移率和分级别风险评估的研究[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(8): 1398-1405.
- [13] 李耀磊, 左甜甜, 徐健, 等. 基于ICP-MS法对4种动物源性药材中16种无机元素的测定及量变规律研究[J]. 药物评价研究, 2020, 43(2): 248-254.
- [14] 李耀磊, 张志成, 金红宇, 等. ICP-MS法测定复方苦参注射液中铜、砷、镉、汞、铅元素的残留量[J]. 药物分析杂志, 2018, 38(10): 1781-1787.

(收稿日期 2022年12月8日 编辑 郑丽娥)