

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241221004

引用格式: 胡利喆, 李鹏, 朱宏, 等. 黄芪中重金属含量分析及风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 120–128.

HU LZ, LI P, ZHU H, *et al.* Analysis and risk assessment of heavy metal content in *Astragalus membranaceus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 120–128. (in Chinese with English abstract).

## 黄芪中重金属含量分析及风险评估

胡利喆<sup>1,2#</sup>, 李鹏<sup>3#</sup>, 朱宏<sup>3</sup>, 陈昊昊<sup>1</sup>, 赵浩然<sup>1</sup>, 陈捷胤<sup>1</sup>,  
戴小枫<sup>1</sup>, 孙永伟<sup>2\*</sup>, 孔志强<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 2. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021;  
3. 江苏省农业科学院公共检测评价鉴定技术中心, 南京 210000)

**摘要:** **目的** 测定黄芪和土壤中铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、锌(Zn)、镍(Ni)、铬(Cr) 8种重金属含量并对其进行风险评估。**方法** 在内蒙古、山西、甘肃、宁夏和陕西5个省份采集了35批样品, 使用电感耦合等离子体质谱法对黄芪和黄芪产地的土壤中8种重金属进行测定, 通过计算每日最大可耐受摄入量、致癌风险、非致癌风险目标危险商数3种不同的风险评估模型来对黄芪不同摄入人群的健康风险进行评估。**结果** 该方法回收率在99.1%~108.8%, 相对标准偏差在0.445%~5.720%范围内, 该方法准确性和精密度良好。35批黄芪重金属平均含量为Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd、Hg, 均无重金属超标情况, 符合2020版《中华人民共和国药典》中重金属限量标准。3种风险评估结果表明黄芪重金属含量对不同人群的健康风险均在可接受范围。**结论** 黄芪中重金属的污染普遍存在, 为了确保黄芪的用药安全, 未来应从黄芪的种植源头、加工方式等环节对黄芪重金属进行防控。

**关键词:** 黄芪; 重金属; 电感耦合等离子体质谱法; 风险评估

## Analysis and risk assessment of heavy metal content in *Astragalus membranaceus*

HU Li-Zhe<sup>1,2#</sup>, LI Peng<sup>3#</sup>, ZHU Hong<sup>3</sup>, CHEN Hao-Hao<sup>1</sup>, ZHAO Hao-Ran<sup>1</sup>, CHEN Jie-Yin<sup>1</sup>,  
DAI Xiao-Feng<sup>1</sup>, SUN Yong-Wei<sup>2\*</sup>, KONG Zhi-Qiang<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences Public Testing, Evaluation and Appraisal Technology Center, Nanjing 210000, China)

**ABSTRACT: Objective** To determine the content of 8 kinds of heavy metals, copper (Cu), lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), mercury (Hg), zinc (Zn), nickel (Ni), and chromium (Cr) in *Astragalus membranaceus* and soil

收稿日期: 2024-12-21

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-21)

#胡利喆和李鹏为共同第一作者

第一作者: 胡利喆(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为中药质量安全评价研究。E-mail: hlz15048413909@163.com

李鹏(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: li\_sxnd@163.com

\*通信作者: 孙永伟(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为分子生物学研究。E-mail: sunyongwei@imu.edu.cn

孔志强(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为中药质量安全评价研究。E-mail: kongzhiqiang@caas.cn

samples, and conduct the risk assessment. **Methods** Thirty-five batches of samples were collected in 5 provinces, namely Inner Mongolia, Shanxi, Gansu, Ningxia and Shaanxi, for the determination of 8 kinds of heavy metals in the soils of *Astragalus* and *Astragalus* origin using inductively coupled plasma mass spectrometry. The health risks of *Astragalus membranaceus* in different intake groups were evaluated by calculating 3 kinds of different risk assessment models, namely, the estimated daily intake, the carcinogenic risk, and the target hazard quotient. **Results** The recoveries were in the range of 99.1%–108.8% with the relative standard deviations in the range of 0.445%–5.720%, which indicated that the accuracy and precision of the method were good. The average heavy metal content of the 35 batches of *Astragalus membranaceus* was Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd and Hg, and no exceedance of heavy metals complied with the limit standards for heavy metals in Chinese herbal medicines in the 2020 edition of *Pharmacopoeia of the People's Republic of China*. The results of the 3 kinds of risk assessments showed that the health risk of heavy metal content of *Astragalus membranaceus* for different groups of people was within the acceptable range. **Conclusion** The contamination of heavy metals in *Astragalus membranaceus* is widespread, and the development of the *Astragalus membranaceus* industry is still potentially risky. In order to ensure the medicinal safety of *Astragalus membranaceus*, the prevention and control of heavy metals in *Astragalus membranaceus* shall be carried out in the future from the planting source of *Astragalus membranaceus*, the processing method, and other aspects of *Astragalus membranaceus*.

**KEY WORDS:** *Astragalus membranaceus*; heavy metals; inductively coupled plasma mass spectrometry; risk assessment

## 0 引言

黄芪为豆科植物蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao] 或膜荚黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge.] 的干燥根。作为我国著名的大宗药材, 药用历史悠久, 为补药之长。中国药典论述其有补气升阳, 固表止汗, 生津养血的功效<sup>[1]</sup>。因其既具有调节免疫<sup>[2]</sup>、抗氧<sup>[3]</sup>、抗炎<sup>[4]</sup>、抗病毒<sup>[5]</sup>、降血糖<sup>[6]</sup>等多种药用价值又具有强身健体的食用价值, 我国在 2023 年 11 月公布的《关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》中将黄芪正式纳入药食同源的名单。黄芪的用途广泛使得近些年国际市场对黄芪的需求极大, 有调查表明, 黄芪曾一度成为我国 1000 万美元以上中药材出口之首<sup>[7]</sup>。然而, 随着黄芪国际化程度的不断提高, 黄芪中外源污染物问题也引起广泛关注。

重金属作为环境中重要的一类外源污染物, 因其具有持久性、不可降解性、潜在毒性以及生物蓄积性而在全球引起广泛关注<sup>[8-11]</sup>。黄芪在污染的环境下种植或在采收、加工、储存当中的不当操作均会使其受到重金属的污染<sup>[12]</sup>。常见的重金属及有害元素主要有铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)和汞(Hg), 重金属超标会对人体造成极大的危害, 如摄入过量的 Cd 会危害肾脏和造成骨损伤<sup>[13-14]</sup>; 而 Hg 超标会使神经系统失常, 甚至会对脑组织造成损伤<sup>[15]</sup>; Pb 是毒性最强的金属之一, 持续接触 Pb 会影响生殖系统、肾脏以及神经系统的正常功能<sup>[16]</sup>; Cu 作为人体健康所必须的

微量元素, 但是摄入大量的 Cu 人类可能出现非致癌毒性症状<sup>[17-18]</sup>。最近的研究表明一些心血管疾病也与长期接触有毒重金属之间存在联系<sup>[19]</sup>。黄芪中重金属污染问题不仅会对人体造成危害, 还会制约黄芪在国际市场的发展<sup>[20]</sup>, 因此重视和解决黄芪中重金属污染问题刻不容缓。目前, 黄芪重金属污染的研究主要聚焦在重金属污染对黄芪生长的影响<sup>[21]</sup>, 也有不少学者对黄芪中重金属含量进行监测研究<sup>[22]</sup>, 但面临着所检测重金属种类较少且样品不够具有代表性等一系列问题, 因此本研究通过采集并研究我国 5 个典型的道地产区黄芪, 旨在能更全面反映黄芪污染的状况和健康风险。

本研究从不同黄芪产区收集了 35 批黄芪样品, 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对黄芪中 Cu、Pb、Cd、As、Hg 等 8 种重金属含量进行检测, 并结合膳食风险评估每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)、目标危险商数(target hazard quotient, THQ)和致癌风险(carcinogenic risk, CR) 3 种风险评估模型对黄芪中重金属含量进行健康风险评估, 为黄芪重金属的质量控制及临床安全用药提供数据支撑, 从而促进黄芪产业健康高质量地可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

iCAP Qc 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Multiwave PRO 微波消解仪(奥地利安东帕有限

公司); UG-12 石墨赶酸仪(浙江纳德科学仪器有限公司); ME204 分析天平(精度为 0.01 mg, 瑞士梅特勒-托利多国际贸易有限公司)。

## 1.2 试剂

铬(Cr)、Cu、镍(Ni)、锌(Zn)、As、Cd、Pb 元素混合标准储备液, 锗(Ge)、铑(Rh)、铟(In)、铈(Re)、铋(Bi)混合标准内标元素储备液(质量浓度均为 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 坛墨质检-标准物质中心); 汞单标储备液(质量浓度均为 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 国家有色金属及电子材料分析测试中心); GSB-19 黄芪标准物质(纯度 98%)、GSS-65 土壤标准物质(纯度 99.9%)(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所); 硝酸(纯度为 65%~68%)、盐酸(分析纯, 纯度为 36%~38%)、氢氟酸(分析纯, 纯度为 50%)(苏州晶瑞化学股份有限公司); 高氯酸(分析纯, 纯度为 70%~72%)(广东大小化工有限公司)。

## 1.3 样品

分别采集来自甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西 5 个黄芪产区共 35 批黄芪样品, 土壤来自内蒙古呼和浩特、山西浑源、甘肃岷县和通渭、宁夏固原和吴忠、陕西绥德。将采集的样品烘干后, 磨碎后过筛, 放置在 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱进行储存备用。

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 ICP-MS 工作条件

ICP-MS 仪器参数: 射频功率 1550 W; 测试模式: 碰撞池动能歧视(kinetic energy discrimination, KED)模式; 等离子体气流量 15 L/min; 载气高纯氩气, 流速 1.0 L/min, 辅助气流量 0.8 L/min; 进样时间 40 s, 稳定时间 18 s, 重复 3 次。

黄芪植株重金属检测时微波消解仪升温程序: 温度从室温至 120  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 5 min; 温度从 120  $^{\circ}\text{C}$  至 160  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 10 min; 温度从 160  $^{\circ}\text{C}$  至 190  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 30 min。

土壤重金属检测时微波消解仪升温程序: 温度从室温至 120  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 3 min; 温度从 120  $^{\circ}\text{C}$  至 160  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 3 min; 温度从 160  $^{\circ}\text{C}$  至 180  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 25 min。

土壤中汞检测时微波消解仪升温程序: 温度从室温至 120  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 3 min; 温度从 120  $^{\circ}\text{C}$  至 180  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 15 min。

### 1.4.2 标准溶液制备

内标元素溶液: 移取内标储备液 0.5 mL 于 1000 mL 容量瓶中, 用 5% 硝酸溶液定容至刻度线, 制得质量浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{L}$  的内标使用液。

混合标准溶液: 移取 Cr、Cu、Ni、Zn、As、Cd、Pb 元素混标储备液与汞元素储备液适量, 用 5% 硝酸溶液定量稀释成质量浓度为: 0、1、2、5、10、20、50、100  $\mu\text{g}/\text{L}$  (Cr、Cu、Ni、Zn、As、Cd、Pb 元素) 与 0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0  $\mu\text{g}/\text{L}$  (Hg 元素) 的标准溶液。

### 1.4.3 样品前处理

黄芪样品前处理方法: 称取黄芪样品 0.5 g(精确至

0.0001 g)于微波消解罐中, 加入 5 mL 硝酸, 加盖放置 2 h 后进行微波消解, 消解结束后, 置于赶酸仪上 100  $^{\circ}\text{C}$  加热 30 min, 后用水定容至 50 mL, 并用 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜, 过滤备用, 同时做空白实验。

土壤样品前处理方法: 参考 HJ 1315—2023《土壤和沉积物 19 种金属元素总量的测定 电感耦合等离子体质谱法》测定土壤中 Cr、Cu、Ni、Zn、As、Cd、Pb 元素含量。参考杨永建等<sup>[23]</sup>检测方法, 测定土壤中 Hg 元素含量。

### 1.4.4 黄芪中重金属污染风险评估

由于黄芪是药食两用的中药材, 且由于重金属的半衰期较长, 所以采用 EDI 进行膳食风险评估, 此外本研究还根据 2000 年美国环境保护局 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 所提出的食品中重金属污染风险评估办法对黄芪中重金属含量进行 CR 和 THQ 评估<sup>[24]</sup>。相应的计算公式如式(1)~(3):

$$\text{EDI} = \frac{C \times \text{IRD}}{\text{BW}} \quad (1)$$

$$\text{CR} = \frac{C \times \text{IRD} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CSF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\text{THQ} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{IRD}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{RFD}} \quad (3)$$

式中:  $C$  表示黄芪中重金属质量分数,  $\text{mg}/\text{kg}$ ;  $\text{BW}$  表示人体的平均体重(body weight), 成人的体重为 60 kg, 儿童体重为 15 kg<sup>[25]</sup>;  $\text{IRD}$  表示黄芪的每日摄入量(daily ingestion rate),  $\text{kg}/\text{d}$ , 2020 版《中华人民共和国药典》(以下简称《中国药典》)规定黄芪的每日用量为 0.009~0.030  $\text{kg}/\text{d}$ , 取平均值为 0.0195  $\text{kg}/\text{d}$ ;  $\text{EF}$  为黄芪暴露于重金属的天数(exposure frequency), 定为 30  $\text{d}$ <sup>[26]</sup>;  $\text{ED}$  为黄芪暴露于重金属的年数(exposure duration), 定为 30 年;  $\text{CSF}$  为癌症强度因子(carcinogenic slope factor), 目前仅有 3 种重金属规定了  $\text{CSF}$ <sup>[27]</sup>, 其中 As 的  $\text{CSF}$  为 1.5  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ , Pb 的  $\text{CSF}$  为 0.0085  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ , Cd 的  $\text{CSF}$  为 6.1  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;  $\text{AT}$  为人体平均接受黄芪中重金属的时间(average time), 可以按照人类平均寿命计算为 70 $\times$ 365  $\text{d}$ ;  $\text{RFD}$  为口服的参考剂量(reference dose),  $\text{mg}/\text{kg}$ , 按照美国环境保护局的规定 Cd 为 0.005  $\text{mg}/\text{kg}$ , As 为 0.0003  $\text{mg}/\text{kg}$ , Hg 为 0.0003  $\text{mg}/\text{kg}$ , Cu 为 0.04  $\text{mg}/\text{kg}$ , Pb 为 0.004  $\text{mg}/\text{kg}$ , Cr 为 1.50  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

## 1.5 数据处理

使用 Excel 2019 对数据进行整理、汇总和统计; 使用 Origin 2022 和 Graphpad pism 9.5 对得到数据进行绘图和显著性分析, 实验进行 3 次重复, 实验结果采用平均值 $\pm$ 标准偏差的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 方法准确性验证

采用有证标准物质验证上述黄芪与土壤样品前处理

方法的准确度与精密度,结果如表1所示。由表1可以得出,使用上述前处理方法对黄芪与土壤样品进行消解,所测8种元素含量均在证书参考值范围内,说明前处理方法具有较高的准确度;为验证方法的精密度,将黄芪与土壤样品平行测定6次,其回收率在99.1%~108.8%,相对标准偏差在0.445%~5.720%范围内,该方法准确性和精密度良好。

## 2.2 黄芪中重金属含量测定

35批黄芪重金属含量测定结果如表2所示,所测8种重金属的平均含量由高到低的顺序为Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd、Hg。黄芪样品8种重金属质量分数如下:Zn, 15.941~52.455 mg/kg, 平均值为27.227 mg/kg; Cu, 4.052~16.720 mg/kg, 平均值为7.893 mg/kg; Cr, 1.175~19.404 mg/kg, 平均值为6.343 mg/kg; Ni, 1.423~4.687 mg/kg, 平均值3.082 mg/kg; Pb, 未检出~0.719 mg/kg, 平均值0.145 mg/kg; As, 未检出~0.026 mg/kg, 平均值0.006 mg/kg; Cd, 未检出~0.018 mg/kg, 平均值0.002 mg/kg; Hg, 未检出~0.013 mg/kg, 平均值0.002 mg/kg。2020版《中国药典》规定药材及饮片中5种重金属的限量标准为Cu不得过20.0 mg/kg、Pb不得过5 mg/kg、Cd不得过1.0 mg/kg、As不得过2.0 mg/kg、Hg不得过0.2 mg/kg。与检测结果相比发现所检测的35批黄芪样品

均未超过限量值。目前,Cr、Ni和Zn目前在中药材暂无相应的限量标准。

## 2.3 不同产地黄芪重金属含量比较

由于Cd、Hg、As检出含量极低且没有在全产地检出,分析其原因可能和不同产地种植黄芪的方式有关,有研究显示,通过轮作可以降低黄芪中重金属的积累水平<sup>[28]</sup>。因此不对这3种重金属单独比较,仅对剩下5种重金属进行比较,具体信息如图1所示。通过对5个省份不同重金属比较发现,黄芪样品中Cu、Cr、Pb、Zn含量最高的样品来自陕西省,而Ni含量最高的样品是来自山西省。与其他产区相比,山西省Cu、Cr、Pb的含量都相对较低,而在内蒙古检出的Ni的含量是最低的。

## 2.4 不同年份黄芪中重金属含量对比

目前,对不同年份植物中重金属含量对比的研究相对较少。程佳雪<sup>[29]</sup>通过对比2016年和2018年40种园林树木中5种重金属(Cu、Pb、Cd、As和Hg)含量比较发现,不同年份园林树木重金属含量有显著差异。因此,本研究对3年生、5年生、7年生、10年生4个年份的黄芪中重金属含量进行对比,具体信息如图2所示,发现并非年份越高的黄芪中重金属含量越高,不同年份黄芪中5种重金属含量并无显著性差异。

表1 黄芪和土壤各元素精密度和加标回收率

Table 1 Precisions and spiked recoveries for each element of *Astragalus membranaceus* and soil

样品名称	测定元素	参考/(mg/kg) <sup>1</sup>	6次测定值/(mg/kg)	回收率/%	相对标准偏差/%
黄芪样品	Cr	2.200±0.400	2.370、2.280、2.380、2.410、2.330、2.270	106.4	2.420
	Cu	8.500±0.700	8.660、8.510、8.710、8.470、8.680、8.560	101.2	1.150
	Ni	2.260±0.150	2.180、2.280、2.280、2.310、2.290、2.270	100.4	2.000
	Zn	22.300±1.000	22.600、22.300、22.700、22.900、23.000、21.900	101.3	1.810
	Pb	1.440±0.100	1.480、1.510、1.470、1.440、1.420、1.400	100.7	2.810
	As	0.570±0.050	0.588、0.575、0.559、0.561、0.569、0.583	100.5	2.040
	Cd	0.042±0.010	0.0435、0.0478、0.0451、0.0455、0.0439、0.0481	108.8	4.230
	Hg	0.012±0.005	0.011、0.012、0.012、0.012、0.012、0.013	100.0	5.720
土壤样品	Cr	59±3	59.1、59.8、59.3、59.9、59.3、59.7	100.3	0.546
	Cu	62±3	62.3、63.5、62.7、62.7、63.4、63.2	101.6	0.749
	Ni	23±0.7	23.3、23.2、22.8、22.1、22.9、22.6	99.1	1.910
	Zn	180±5	181、183、182、178、179、184	100.6	1.280
	As	6.6±0.3	6.58、6.69、6.49、6.56、6.69、6.72	100.3	1.380
	Pb	71±2	71.4、71.5、71.7、71.9、72.2、71.4	101.0	0.445
	Cd	0.171±0.011	0.177、0.178、0.169、0.175、0.169、0.173	101.8	2.240
	Hg	0.134±0.007	0.133、0.138、0.133、0.134、0.135、0.139	100.7	1.910

注:<sup>1</sup>为有证标准物质的含量。

表 2 黄芪中重金属质量分数( $n=3$ , mg/kg)  
Table 2 Mass fraction of heavy metals in *Astragalus membranaceus* ( $n=3$ , mg/kg)

批次	产区	Cr	Cu	Ni	Zn	As	Cd	Hg	Pb
YC202301	陕西	7.850±0.596	6.762±0.071	3.732±0.272	24.472±0.264	0.018±0.003	-	-	0.135±0.008
YC202302	陕西	4.155±0.232	7.974±0.093	3.224±0.157	52.455±0.979	-	-	-	0.082±0.029
YC202303	陕西	3.025±0.556	7.601±0.299	2.931±0.289	48.958±1.920	0.009±0.013	-	-	0.010±0.019
YC202304	陕西	5.595±0.776	8.776±1.196	3.235±0.156	31.486±9.489	-	-	0.008±0.001	0.184±0.067
YC202305	陕西	7.430±0.824	6.307±1.582	3.340±0.306	21.814±0.994	-	-	-	0.226±0.006
YC202306	陕西	3.360±0.128	5.510±0.268	2.181±0.033	19.675±1.098	0.017±0.028	-	-	0.007±0.014
YC202307	陕西	4.875±0.205	9.086±0.686	2.276±0.188	21.621±0.762	0.008±0.015	-	-	0.123±0.008
YC202308	陕西	4.362±0.360	7.145±0.237	3.438±0.201	21.182±0.161	0.016±0.010	-	-	0.233±0.057
YC202309	陕西	4.270±0.237	11.330±6.374	2.055±0.107	19.424±0.323	-	-	-	0.160±0.001
YC202310	陕西	3.443±0.215	7.048±0.376	2.686±0.148	22.076±0.007	-	-	-	0.204±0.147
YC202311	陕西	5.951±1.224	9.636±0.769	3.469±0.961	29.777±3.274	-	-	-	0.236±0.054
YC202312	陕西	4.374±0.929	13.817±2.064	1.943±0.049	22.814±0.108	-	-	-	0.087±0.019
YC202313	陕西	5.892±0.537	9.003±0.246	2.192±0.246	20.850±1.948	-	-	-	0.204±0.061
YC202314	陕西	7.678±0.117	10.582±0.815	4.286±0.138	30.345±0.041	-	-	-	0.279±0.005
YC202315	陕西	6.165±0.249	9.141±0.193	3.530±0.665	24.318±0.241	0.022±0.027	-	0.008±0.001	0.281±0.037
YC202316	陕西	7.343±1.764	7.921±0.734	3.247±0.535	20.511±1.589	0.006±0.009	-	-	0.296±0.029
YC202317	陕西	2.280±1.257	5.667±1.422	2.935±0.513	28.301±6.797	0.014±0.002	-	-	0.028±0.042
YC202318	陕西	2.618±1.050	13.904±2.604	2.612±0.125	46.396±0.803	0.026±0.043	-	-	0.045±0.003
YC202319	陕西	7.790±0.926	7.158±0.413	2.463±0.461	25.394±1.869	-	-	-	0.153±0.035
YC202320	陕西	4.743±3.245	6.920±0.166	2.500±0.014	21.600±1.242	-	-	-	0.719±0.050
YC202321	陕西	4.407±2.268	16.720±3.738	2.151±0.594	22.355±1.568	0.006±0.001	-	-	0.056±0.087
YC202322	陕西	11.834±2.785	6.377±0.116	4.060±0.228	28.902±1.014	0.012±0.010	-	-	0.125±0.042
YC202323	陕西	19.201±0.103	7.436±0.167	2.736±0.494	15.941±1.177	-	-	-	0.264±0.184
YC202324	陕西	8.345±0.111	8.690±0.024	2.369±0.466	33.880±5.746	0.007±0.020	-	-	0.041±0.056
YC202325	陕西	19.404±1.794	8.983±0.785	3.356±0.317	27.726±2.348	0.009±0.001	-	-	0.058±0.027
YP202326	山西	3.410±0.118	4.836±0.242	5.278±0.267	29.603±0.476	-	0.013±0.008	-	-
YP202327	山西	1.849±0.114	4.549±0.197	3.946±0.190	25.959±0.131	-	0.010±0.003	-	-
YP202328	山西	1.175±0.219	4.375±0.202	4.687±0.044	26.744±0.486	-	-	-	-
YP202329	山西	3.483±0.145	4.052±0.145	4.526±0.131	28.396±0.251	-	0.016±0.004	-	0.029±0.011
YP202330	山西	2.210±0.404	4.626±0.093	4.219±0.227	25.014±1.245	-	0.018±0.005	-	0.022±0.002
YC202331	甘肃	10.651±1.101	5.530±0.089	1.825±1.430	23.401±0.181	0.014±0.005	-	-	0.118±0.075
YC202332	甘肃	3.552±1.041	5.200±1.507	2.220±1.383	25.803±0.274	-	-	0.009±0.001	0.156±0.144
YC202333	宁夏	10.247±0.163	6.978±1.117	3.549±1.432	22.900±1.436	0.012±0.015	-	0.013±0.001	0.168±0.231
YC202334	宁夏	13.863±3.853	8.823±1.390	3.253±0.706	25.695±9.770	-	-	0.011±0.002	0.260±0.082
YC202335	内蒙古	5.163±0.241	7.793±1.325	1.423±0.076	37.176±0.472	-	-	0.007±0.002	0.113±0.097

注: 重金属质量分数采用平均值±标准差的形式表示; 批次中 YC 表示药材; YP 表示饮片; -表示未检测到。

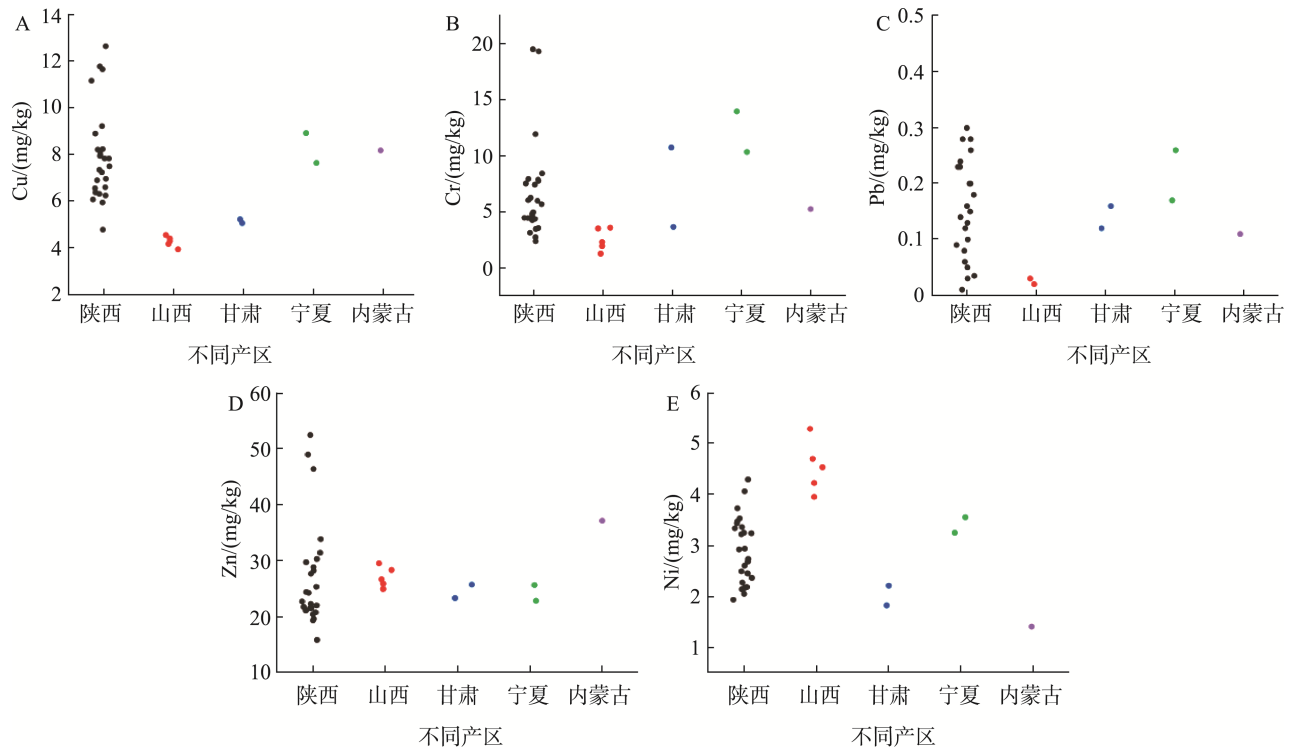
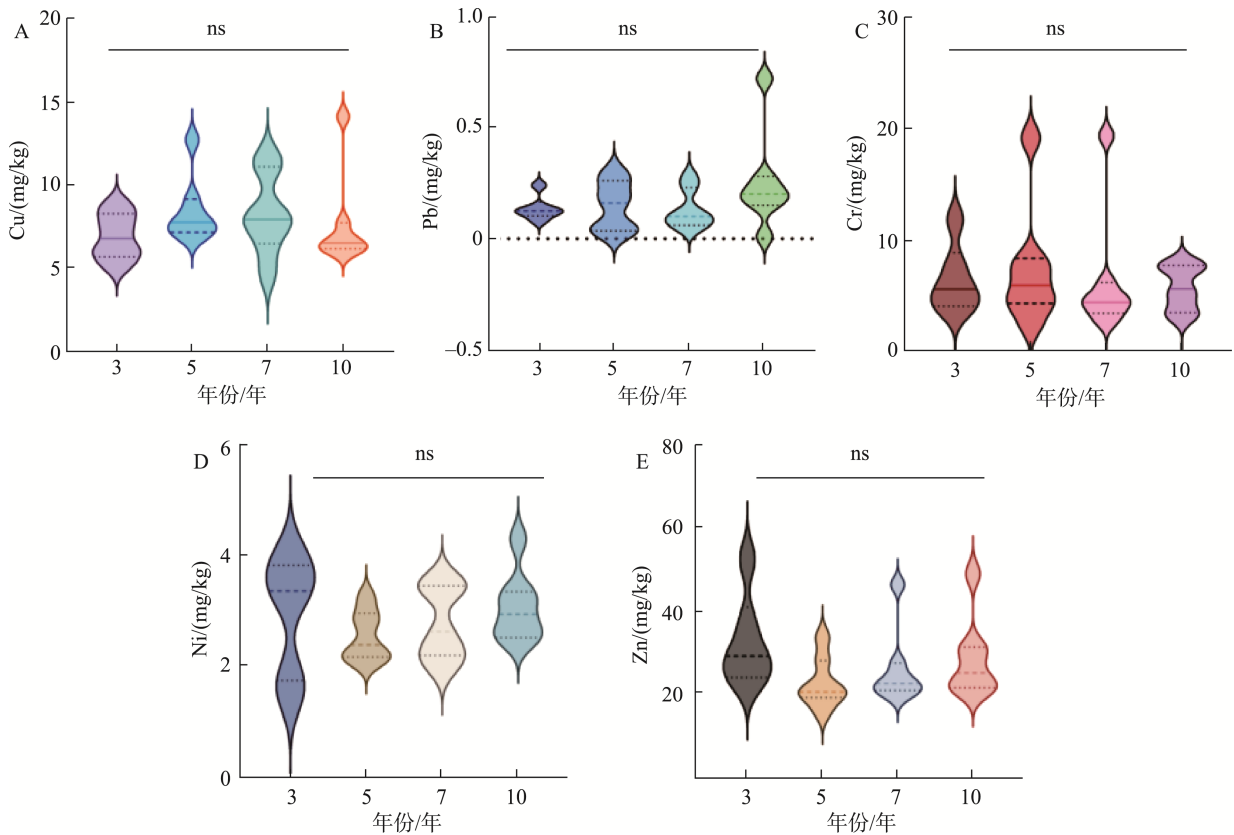


图 1 不同产区黄芪重金属含量比较

Fig.1 Comparison of heavy metal content in *Astragalus membranaceus* from different production areas



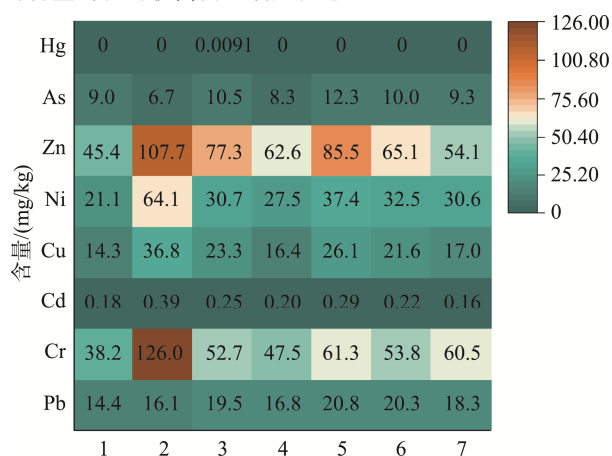
注: ns 表示无差异( $P>0.05$ )。

图 2 不同年份黄芪重金属含量比较

Fig.2 Comparison of heavy metal content of *Astragalus membranaceus* in different years

## 2.5 黄芪种植产区土壤重金属含量对比

在中药材种植过程中,土壤作为中药材生长的主要场所,是植物药获取重金属的主要来源<sup>[30]</sup>。因此,本研究对黄芪种植产地土壤中 8 种重金属含量进行检测,结果如图 3 所示,其中 Cr 的检出范围为 38.2~126.0 mg/kg、Cd 的检出范围为 0.16~0.39 mg/kg、As 的检出范围为 6.7~12.3 mg/kg、Zn 的检出范围为 45.4~107.7 mg/kg、Pb 的检出范围 14.4~20.8 mg/kg、Cu 的检出范围为 14.3~36.8 mg/kg、Ni 的检出范围为 21.13~64.13 mg/kg。经过检测发现除 Hg 以外,其他 7 种重金属均有检出。此外,7 个产地土壤中 Cr 和 Zn 的含量均相对较高需要引起注意。



注:1~7 分别为呼和浩特、浑源、岷县、绥德、通渭、固原、吴忠。

图 3 黄芪产地土壤重金属含量对比热图

Fig.3 Contrasting thermogram of heavy metal content in soil of *Astragalus membranaceus* origins

## 2.6 风险评估

黄芪重金属风险评估是对人类由于接触重金属而对健康具有已知或可能的严重不良作用的科学评估,通过风险评估可以更加科学、全面、有效地看待黄芪重金属污染的问题<sup>[31]</sup>。本研究通过计算 EDI、THQ 和 CR 3 个指标对

黄芪中重金属进行风险评估<sup>[32-33]</sup>,具体信息如表 3 所示。

EDI 是膳食风险评估的基本参数,通过将 EDI 与每日暂定可耐受摄入量(provisional tolerable daily intake, PTDI)进行对比。当 EDI>PTDI 时,认为摄入风险对人体有明显的健康风险,反之当 EDI<PTDI 时,认为摄入风险对人体没有明显的健康风险。根据联合国粮农组织和世界卫生组织(Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food Additives, JECFA)的规定,Cu 和 Hg 的 PTDI 分别 0.50000 mg/kg 和 0.00057 mg/kg,而 Cd 的每月暂定可耐受摄入量(provisional tolerable month intake, PTMI)为 0.02500 mg/kg, Pb 和 As 的健康指导值采用世界卫生组织所规定的将成年人心血管效应作为 Pb 的毒理终点,其收缩压基准剂量下限作为健康指导值(0.00130 mg/kg),同样提出由无机砷导致肺癌发病率比背景值增长 0.5%的基准剂量下限为健康指导值(0.00300 mg/kg)<sup>[34]</sup>。经过对比发现不论是成人还是儿童的 EDI 均远远小于健康指导值,说明黄芪中重金属的慢性膳食暴露风险可以忽略不计。此外,根据健康指导值进行计算可以得到对人类造成危害的黄芪重金属摄入的临界剂量,例如 Cu 每天摄入量超过 3.80223 kg/d 会对人体造成危害,Hg、Cd、Pb、As 的临界剂量分别为 1.71000、75.00000、0.52000、25.71428 kg/d。

THQ 一般用来评估重金属对人体的非致癌健康风险。当 THQ>1 时,认为重金属会对人体健康有不可接受的潜在危害,当 THQ<1 时,认为重金属对人体的非致癌风险的可以被忽略的。由表 3 可知,成人和小孩的 THQ 均小于 1,说明不会对暴露人群造成明显的非致癌风险。

CR 是用于评估人的一生因暴露在重金属致癌危害中而患癌症的几率。一般的,认为 CR>1×10<sup>-4</sup> 时,致癌风险是不可以接受的,而 CR<1×10<sup>-6</sup> 时,致癌风险是可以接受的。由表 3 可知黄芪中 As、Pb、Cd 的 CR 均小于 1×10<sup>-6</sup>,成人和儿童不存在因为食用黄芪而产生致癌的风险。

表 3 黄芪中重金属的 EDI、THQ 和 CR 统计

Table 3 EDI, THQ and CR statistics of heavy metals in *Astragalus membranaceus*

元素	EDI/[mg/(kg·d)]		THQ		CR	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	2.28E-06	9.10E-06	1.64E-05	6.56E-05	1.23E-13	4.93E-13
Cu	2.56E-03	1.02E-02	2.30E-04	9.20E-04	-	-
Hg	6.50E-07	2.60E-06	7.80E-06	3.12E-05	-	-
Pb	4.88E-05	1.95E-04	4.39E-05	1.76E-04	1.50E-14	6.00E-14
Cd	6.50E-07	2.60E-06	4.68E-07	1.87E-06	1.43E-13	5.73E-13
Cr	2.06E-03	8.24E-03	4.95E-06	1.98E-05	-	-
Ni	1.00E-03	4.00E-03	-	-	-	-
Zn	8.85E-03	3.53E-02	-	-	-	-

注:-表示由于缺乏相关的标准导致无法计算。

### 3 结 论

本研究对 35 批次黄芪中 Zn、Cu、Cr、Ni、Pb、As、Cd、Hg 等 8 种重金属含量进行测定, 探讨了 5 个产区黄芪重金属含量的差异和不同年份黄芪重金属含量的差异, 发现 8 种重金属的平均含量由高到低的顺序为 Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd、Hg, 该结果与孔丹丹等<sup>[26]</sup>在党参中检测重金属的结果相类似, 此外, 张孙等<sup>[35]</sup>的研究表明中药材在生长过程中 Cu 元素会被优先选择吸收, 这可能是黄芪中 Cu 含量偏高的原因。本研究还探讨了黄芪种植土壤中重金属含量, 不同地区土壤中重金属含量相差较大, 反映出我国不同地区种植黄芪环境的差异, 因此加大黄芪的源头监控对黄芪安全生产具有重要意义。结果表明, 除了 Cr、Ni 和 Zn 由于没有规定的标准无法比较外, 所检测的 35 批样品中其他 5 种重金属含量均符合 2020 版《中华人民共和国药典》规定。不同年份黄芪中重金属含量没有显著差异。通过 EDI、CR、THQ 等 3 种风险评估模型对黄芪中重金属可能造成的健康风险进行评估, 风险评估结果显示, 35 批次黄芪样品未对成人和儿童造成致癌和健康风险。本研究因采集样品数量有限, 部分产区样品量仅 1~2 份, 缺乏一定的代表性, 后续将加大各黄芪产区的样品量, 进一步加强对黄芪中重金属元素的分析和讨论。

### 参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.  
China Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: One [M]. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020.
- [2] CHEN ZJ, LIU LJ, GAO CF, *et al.* *Astragali radix* (Huangqi): A promising edible immunomodulatory herbal medicine [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 258: 112895.
- [3] WANG RF, DING AP, WANG JY, *et al.* Astragalin from *Thesium chinense*: A novel anti-aging and antioxidant agent targeting IGFR/CD38/sirtuins [J]. *Antioxidants*, 2024, 13(7): 859–859.
- [4] 王丞, 姚坪, 陈惠丽. 黄芪多糖活性的研究进展[J]. *中国动物保健*, 2024, 26(6): 105–106.  
WANG C, YAO P, CHEN HL. Progress in the study of polysaccharide activity of *Astragalus membranaceus* [J]. *China Animal Health*, 2024, 26(6): 105–106.
- [5] 吴振波, 邵淑蓉, 陈虹宇. 黄芪多糖对呼吸道合胞病毒所致幼鼠肺部感染的抗病毒作用及其机制[J]. *解放军医学杂志*, 2022, 47(4): 346–352.  
WU ZB, SHAO SR, CHEN HY. Antiviral effects and mechanism of *Astragalus* polysaccharide on respiratory syncytial virus induced lung infection in young mice [J]. *Medical Journal of Chinese People's Liberation Army*, 2022, 47(4): 346–352.
- [6] WU Y, OUYANG JP, WU K, *et al.* Hypoglycemic effect of *Astragalus* polysaccharide and its effect on PTP1B [J]. *Acta Pharmacologica Sinica*, 2005, 26(3): 345–52.
- [7] 秦雪梅, 李震宇, 孙海峰, 等. 我国黄芪药材资源现状与分析[J]. *中国中药杂志*, 2013, 38(19): 3234–3238.  
QIN XM, LI ZY, SUN HF, *et al.* Status and analysis of *Astragali radix* resource in China [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, 38(19): 3234–3238.
- [8] ZHUANG W, LIU YX, CHEN Q, *et al.* A new index for assessing heavy metal contamination in sediments of the Beijing-Hangzhou Grand Canal (Zaozhuang Segment): A case study [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 252–260.
- [9] ZHANG ZY, YING LJ, MAMAT Z, *et al.* Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 126: 94–101.
- [10] OTANSEV P, TASKIN H, BASSARI A, *et al.* Distribution and environmental impacts of heavy metals and radioactivity in sediment and seawater samples of the Marmara Sea [J]. *Chemosphere*, 2016, 154: 266–275.
- [11] JIANG ZG, XU N, LIU BX, *et al.* Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 157(15): 1–8.
- [12] 黄江深, 范家文, 倪世壮, 等. 中药中重金属污染相关问题研究[J]. *微量元素与健康研究*, 2022, 39(5): 34–36  
HUANG JS, FAN JW, NI SZ, *et al.* Study on the problems related to heavy metal pollution in traditional Chinese medicine [J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2022, 39(5): 34–36.
- [13] AKESSON A, BARREGARD L, BERGDAHL IA, *et al.* Non-renal effects and the risk assessment of environmental cadmium exposure [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(5): 431–438.
- [14] 丁通, 骆骄阳, 杨世海, 等. 天然药物防治镉中毒的现代研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(10): 2006–2013.  
DING T, LUO JY, YANG SH, *et al.* Recent research progress on natural medicines in treatment of cadmium toxicity [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(10): 2006–2013.
- [15] 杨乾巍, 杨迪, 张良, 等. 我国 47 种中药材中重金属含量分析与数据挖掘[J]. *中国现代中药*, 2024, 26(4): 625–634.  
YANG QW, YANG D, ZHANG L, *et al.* Heavy metals in 47 chinese medicinal materials: A data mining [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2024, 26(4): 625–634.
- [16] BASSIL M, DAOU F, HASSAN H, *et al.* Lead, cadmium and arsenic in human milk and their socio-demographic and lifestyle determinants in Lebanon [J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 911–921.
- [17] ZHANG XD, HUANG HY, ZHUANG ZL, *et al.* The association between serum copper concentrations and cardiovascular disease risk factors in children and adolescents in NHANES [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 16951–16958.
- [18] ZHOU J, LIANG JN, HU YM, *et al.* Exposure risk of local residents to copper near the largest flash copper smelter in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630(15): 453–461.
- [19] PAN ZW, GONG TY, LIANG P. Heavy metal exposure and cardiovascular disease [J]. *Circulation Research*, 2024, 134(9): 1048–1060.
- [20] PENG CN, KANG LP, YUAN X, *et al.* Research progress in the analysis

- of chemical forms of mercury in traditional Chinese medicine [J]. *Processes*, 2023, 11(10): 2821.
- [21] 张旭丽, 闫海生, 李洪. 黄芪重金属污染研究进展[J]. *中南农业科技*, 2024, 45(4): 234–237, 253.  
ZHANG XL, YAN HS, LI H. Progress on heavy metal contamination of *Astragalus membranaceus* [J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2024, 45(4): 235–237, 253.
- [22] 张思维, 李东梅, 刘小云, 等. 甘肃产黄芪重金属含量特征分析及健康风险评估[J]. *食品与机械*, 2023, 39(5): 38–42, 69.  
ZHANG SW, LI DM, LIU XY, *et al.* Analysis of heavy metal content and health risk assessment of *Astragalus membranaceus* in Gansu Province [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(5): 38–42, 69.
- [23] 杨永建, 夏莎莎, 李红华, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定土壤中的汞[J]. *中国测试*, 2022, 48(10): 46–50.  
YANG YJ, XIA SS, LI HH, *et al.* Determination of mercury in soils by ICP-MS with microwave digestion [J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(10): 46–50.
- [24] 卜桐, 于晓, 张欣芮, 等. 金银花中重金属污染分析及其健康风险评估[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(3): 643–650.  
BU T, YU X, ZHANG XR, *et al.* Analysis of heavy metal pollution in *Lonicerae japonicae* Flos and its health risk assessment [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2022, 47(3): 643–650.
- [25] 肖欧丽. 枸杞种植及炮制加工过程中农药残留行为研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.  
XIAO OUL. Study on the behavior of pesticide residues during cultivation and decoction processing of wolfberry [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.
- [26] 孔丹丹, 李歆悦, 闫卉欣, 等. 药食两用植物药中重金属污染及其健康风险评估模型的建立—以黄芪、党参、昆布为例[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(23): 5042–5050.  
KONG DD, LI XY, YAN HX, *et al.* Modeling of heavy metal contamination and its health risk assessment in medicinal and food botanicals—A case study of *Astragalus membranaceus*, *Radix et Rhizoma ginseng*, *Radix et Rhizoma gombosae* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(23): 5042–5050.
- [27] 骆璐. 药用植物多农残重金属的大样本检测及综合风险评估[D]. 北京: 中国中医科学院, 2021.  
LUO L. Large sample detection and comprehensive risk assessment of multi-residue heavy metals in medicinal plants [D]. Beijing: Chinese Academy of Chinese Medicine, 2021.
- [28] 陈玉敏. 轮作对重金属积累的影响及蒙古黄芪重金属污染健康风险评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.  
CHEN YM. Effects of crop rotation on heavy metal accumulation and health risk assessment of heavy metal pollution of *Astragalus membranaceus* in Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [29] 程佳雪. 北京 40 种园林树木重金属吸收能力评价与筛选[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.  
CHEN JX. Evaluation and screening of heavy metal absorption capacity of 40 garden trees in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [30] 王超, 刘畅, 胡清, 等. 植物药重金属污染状况及全链条生产过程污染的溯源与管控[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3789–3800.  
WANG C, LIU C, HU Q, *et al.* Pollution status of heavy metals in herbal medicine and their traceability & control in the whole chain production process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3789–3800.
- [31] XU M, CHEN QS, KONG XB, *et al.* Heavy metal contamination and risk assessment in winter jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2023, 174: 113645.
- [32] ZUO TT, JIN HY, ZHANG L, *et al.* Innovative health risk assessment of heavy metals in Chinese herbal medicines based on extensive data [J]. *Pharmacological Research*, 2020, 159: 104987.
- [33] 牟霄, 魏宇琛, 张崇森, 等. 陕西省市售茶叶的铅污染状况及健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(24): 294–300.  
MOU X, WEI YC, ZHANG SM, *et al.* Lead contamination and health risk assessment of commercial tea in Shaanxi Province [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(24): 294–300.
- [34] 左甜甜, 张磊, 石上梅, 等. 10 种根和根茎类中药材中重金属及有害元素的风险评估及最大限量理论值[J]. *药物分析杂志*, 2020, 40(10): 1870–1876.  
ZUO TT, ZHANG L, SHI SM, *et al.* Risk assessment and theoretical maximum limit values of heavy metals and harmful elements in 10 roots and rootstocks of Chinese materia medica [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2020, 40(10): 1870–1876.
- [35] 张松, 刘晓媛, 吴迪. 6 种药食同源中药材重金属及健康风险评估[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(6): 33–38.  
ZHANG S, LIU XY, WU D. Evaluation of heavy metals and health risks of six types of chinese herbal medicines with food and medicine [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences edition)*, 2020, 38(6): 33–38.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)