

· 论著 · 一次研究 ·

贵州省中药饮片重金属及有害元素含量测定及健康风险评估

朱迪¹, 苏松柏¹, 唐艺², 陈舒忆³

1. 贵州中医药大学第一附属医院制剂中心 (贵阳 550001)

2. 贵阳市食品药品检验检测中心中药室 (贵阳 550081)

3. 贵阳市食品药品检验检测中心质量科 (贵阳 550081)

【摘要】目的 对贵州省不同来源的 216 批中药饮片重金属及有害元素进行测定, 并对其潜在污染风险进行评估, 为保障用药安全提供科学依据。**方法** 采用石墨炉原子吸收光谱法对中药饮片中铅、镉含量进行测定, 采用火焰原子吸收光谱法对铜含量进行测定, 利用氢化物发生-原子荧光光谱法对砷、汞的含量进行测定。采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。**结果** 实验测定了 45 种中药饮片中的铅、镉、铜、汞、砷含量, 其检出率达 100%。对其进行污染物潜在风险评价, 结果显示, 成人按每日最大用药剂量分别食用地龙、僵蚕、九香虫三类饮片时存在潜在风险, 儿童按每日最大用药剂量分别食用地龙、僵蚕、九香虫、三七、蝉蜕、大青叶、金银花及土鳖虫八类饮片时存在潜在风险。**结论** 本研究通过一系列方法优化对中药饮片的重金属及有害元素进行了测定, 对其进行了潜在风险评估, 对中药饮片重金属污染控制及保障用药安全具有一定参考价值。

【关键词】 中药饮片; 重金属; 有害元素; 含量测定; 风险评估**【中图分类号】** R 284.1 **【文献标识码】** A

Determination and health risk assessment of heavy metals and harmful elements in traditional Chinese medicine decoction pieces from Guizhou Province

ZHU Di¹, SU Songbai¹, TANG Yi², CHEN Shuyi³

1. Preparation Center, The First Affiliated Hospital of Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550001, China

2. Department of Traditional Chinese Medicine, Guiyang Food and Drug Inspection and Testing Center, Guiyang 550081, China

3. Department of Quality Control, Guiyang Food and Drug Inspection and Testing Center, Guiyang 550081, China

Corresponding author: CHEN Shuyi, Email: shuyeechan@126.com

【Abstract】Objective To determine the heavy metals and harmful elements in 216 batches of traditional Chinese medicine decoction pieces from different sources in Guizhou Province, and assess their potential risk of contamination, in order to provide a scientific basis for ensuring medication safety. **Methods** The content of lead and cadmium in traditional Chinese medicine decoction pieces were determined by graphite furnace atomic absorption spectrometry,

DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503095

基金项目: 贵州省中药炮制技术传承基地 (黔中医药函 [2024] 22 号); 贵阳市科技计划项目 (筑科合同 [2019] 9-2-33 号); 贵州中医药大学医院制剂研究与开发科技创新团队 (贵中医 TD 合字 [2023] 005 号)

通信作者: 陈舒忆, 高级工程师, Email: shuyeechan@126.com

the content of copper was determined by flame atomic absorption spectrometry, and the content of arsenic and mercury was determined by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry. Statistical analysis was performed using SPSS 22.0 software. **Results** The contents of lead, cadmium, copper, mercury and arsenic in 45 kinds of traditional Chinese medicine decoction pieces were determined, with a detection rate of 100%. The potential risk assessment showed that there were potential risks when adults took *Pheretima*, *Bombyx Batryticatus* and *Aspongopus* at the maximum daily dosage, and when children took *Pheretima*, *Bombyx Batryticatus*, *Aspongopus*, *Panax notoginseng*, *Cicadae Periostracum*, *Isatidis Folium*, *Lonicerae Japonicae Flos* and *Eupolyphaga* at the maximum daily dosage. **Conclusion** This study determined the heavy metals and harmful elements in traditional Chinese medicine decoction pieces through a series of optimized methods, and conducted potential risk assessment, which had certain reference value for the control of heavy metal pollution in traditional Chinese medicine decoction pieces and ensuring medication safety.

【Keywords】 Traditional Chinese medicine decoction pieces; Heavy metals; Harmful elements; Content determination; Risk evaluation

近年来, 中医药的独特疗效和临床应用价值逐渐受到国际社会的认可, 但环境污染导致的中药材质量安全问题也引起了广泛关注。研究表明, 重金属及有害元素的污染已成为影响中药安全性的重要因素^[1-3]。根据毒性和生物蓄积特性, 这些污染物可分为两类, 第一类为典型重金属铅(Pb)、镉(Cd)和铜(Cu), 第二类为有害元素汞(Hg)和砷(As)^[4-5]。这些污染物在人体内积累到一定浓度后, 可能对神经系统、内分泌系统、肝肾等重要器官以及免疫功能造成不可逆的损伤^[6-13]。土壤中的重金属及有害元素进入药用植物后, 其生物富集系数受植物种类、生长年限及环境污染程度等多因素影响。目前, 中药饮片重金属及有害元素单纯依靠总量控制已无法满足精准监管的需求。因此, 推动“检测技术形态化、风险评估个体化、质量控制全程化”的三维管控体系, 成为中医药国际化发展的重要研究方向, 这一体系构建将成为未来中医药研究的重要课题^[14-18]。本研究采用石墨炉原子吸收光谱法测定中药饮片中铅、镉含量, 采用火焰原子吸收光谱法检测铜含量, 并运用氢化物发生-原子荧光光谱法对砷、汞两种元素进行定量分析, 以期安全用药提供参考。

1 资料与方法

1.1 饮片收集

对贵州省各大饮片生产企业、医院、药店、药材市场中常用中药饮片进行广泛收集, 得到 45

种动植物中药饮片共 216 批, 41% 由饮片生产企业提供, 46% 来自药店、正规药材市场, 其余 13% 来自贵阳市各个集市(非正规药材市场)。

1.2 材料

1.2.1 仪器与设备

AA800 原子吸收光谱仪(美国 Perkin-Elmer 有限公司); AFS-8220 原子荧光光谱仪(北京吉天仪器有限公司); EL-240 电子分析天平(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); 超纯水机(型号: WP-UP-11-20, 四川沃特尔特水处理设备有限公司); 高压消解罐(内罐为聚四氟乙烯内罐, 外罐为不锈钢罐, 南京瑞尼克科技开发有限公司); 电子温控加热板(型号: EH 20A plus, 北京莱伯泰科仪器股份有限公司); 高纯氩气、高纯乙炔(贵阳申建气体公司)。

1.2.2 试剂与药品

硝酸(批号: 20141016, 优级纯)、氢氧化钠(批号: 20130807, 分析纯)、硼氢化钠(批号: 20140411, 分析纯)、盐酸(批号: 20140918, 优级纯)均购于国药集团化学试剂有限公司; 镉(Cd, 批号: GSB04-1721-2004)、汞(Hg, 批号: GSB04-1729-2004)和砷(As, 批号: GSB04-1714-2004)标准溶液(浓度均为 1 000 $\mu\text{g/mL}$)由国家有色金属及电子材料分析测试中心提供; 铜(Cu, 批号: 201411)和铅(Pb, 批号: 201501)成分分析标准物质(1 000 $\mu\text{g/mL}$)购自全国化工标准物质委员会标准物质研究开发中心。

1.3 方法

1.3.1 溶液的制备

①铅、镉、铜、汞、砷标准溶液系列：参照《中华人民共和国药典》^[19]2020 年版四部进行配制，最后得到铅工作液（0.05 μg/mL）、镉工作液（0.02 μg/mL）、铜储备液（5 μg/mL）、汞储备液（5 μg/mL）和砷储备液（500 ng/mL）；②铜标准曲线溶液：分别取 0~8.00 mL 储备液梯度稀释，用 0.2% 硝酸定容至 100 mL，建立标准曲线。③汞标准曲线溶液：分别取 0~2.00 mL 储备液，加 5.0 mL 浓盐酸后定容至 100 mL，制备标准系列。④砷标准曲线溶液：分别取 0~4.0 mL 使用液，加入 5.0 mL 浓盐酸和 5 mL 20% 硫脲溶液，定容至 100 mL 完成标准系列制备。所有稀释过程均使用经校准的容量器具，定容后充分混匀。标准系列溶液现配现用，避免长时间保存。⑤铅、镉、铜供试品溶液制备：采用高压密闭消解法进行处理，具体制备过程为精密称定过 40 目筛的金银花样品粉末 0.5 g，置聚四氟乙烯高压消解罐中，加 7 mL 硝酸密闭，放入不锈钢套中，旋紧密封。将消解罐置于 170 °C 电热鼓风干燥箱中保持 3 h，取出待冷却至室温后，转移至置控温电热板上 100 °C 加热至红棕色气体挥尽，剩余溶液约 1 mL，消解液用超纯水转至 25 mL 量瓶中，定容至刻度，摇匀后备用。⑥汞、砷供试品溶液制备：采用高压密闭消解法进行处理，具体制备过程为精密称定过 40 目筛的金银花样品粉末 0.5 g，置聚四氟乙烯高压消解罐中，加 7 mL 硝酸密闭，放入不锈钢套中，旋紧密封。将消解

罐置于 170 °C 电热鼓风干燥箱中保持 3 h，取出待冷却至室温后，转移至置控温电热板上 100 °C 加热至红棕色气体挥尽，剩余溶液约 1 mL，消解液用超纯水转至 50 mL 量瓶中，加入 10% 硫脲溶液 5 mL 和 50% 盐酸溶液 5 mL 后用超纯水定容至刻度，摇匀后备用。⑦基体改进剂、还原剂的配制、载流液的配制、20% 硫脲溶液：参照《中华人民共和国药典》2020 年版四部^[19]进行配制。

1.3.2 仪器工作参数的设定

采用石墨炉原子吸收光谱法测定铅、镉含量，采用火焰原子吸收光谱法测定铜含量，采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定砷、汞含量。不同金属离子设定不同的工作参数，见表 1 至表 3。

1.3.3 分析方法

1.3.3.1 线性关系

按 1.3.1 项下方法制备标准溶液，并按 1.3.2 项下仪器条件分别测定镉、铅、汞、砷、铜元素的标准曲线溶液，并绘制工作曲线。通过 11 次重复测定空白溶液的吸光度和荧光强度，以 3 倍标准偏差与标准曲线斜率的比值计算得到方法检出限。结果表明，该方法在设定浓度范围内呈现良好的线性响应（ $r > 0.999$ ），详见表 4。

1.3.3.2 精密度试验

①石墨炉原子吸收光谱法测定：分别配制含铅 40 ng/mL 和镉 10.0 ng/mL 的混合标准溶液，采用自动进样系统进行测定（进样体积：4 μL 铅工作液 + 基体改进剂 3 μL；10 μL 镉工作液 + 基体改进剂 3 μL）。6 次平行测定结果显示，铅、镉的相对标准偏差（relative standard deviation，

表1 石墨炉原子吸收光谱法仪器参数

Table 1. Instrument parameters of graphite furnace atomic absorption spectrometry

元素名称	波长 (nm)	狭缝 (nm)	灯电流 (mA)	干燥温度 (°C)	干燥时间 (s)	灰化温度 (°C)	灰化时间 (s)	原子化温度 (°C)	原子化时间 (s)	基体 改进剂
铅	238.3	0.7	60	110	30	950	20	1 600	5	Mg(NO ₃) ₂
镉	228.8	0.7	60	110	25	800	25	1 700	5	Mg(NO ₃) ₂

表2 火焰原子吸收光谱法仪器参数

Table 2. Instrument parameters of flame atomic absorption spectrometry

元素名称	波长 (nm)	狭缝 (nm)	灯电流 (mA)	乙炔气流 (L/min)	空气气流 (L/min)
铜	324.7	1.4	4	1.6	6

表3 氢化物发生-原子荧光光谱法仪器参数

Table 3. Instrument parameters of hydride generation-atomic fluorescence spectrometry

元素名称	波长 (nm)	原子化温度 (°C)	灯电流 (mA)	载气流 (L/min)	屏蔽气流 (L/min)	还原剂	载流
汞	253.6	800	80	400	1	1%NaBH ₄	0.5%HCl
砷	193.7	800	80	400	1	0.3%NaOH	

表4 各元素回归方程及相关系数
Table 4. Regression equations and correlation coefficients of the elements

元素名称	回归方程	相关系数 (r)	检出限
镉	$A=5.50 \times 10^{-2}C-2.00 \times 10^{-4}$	0.999 4	3 pg/mL
铅	$A=1.60 \times 10^{-3}C+3.00 \times 10^{-3}$	0.999 8	1.2 ng/mL
汞	$A=1.05 \times 10^{-2}C+3.00 \times 10^{-4}$	0.999 8	0.03 ng/mL
砷	$A=2.40 \times 10^{-3}C+1.10 \times 10^{-3}$	0.999 9	0.1 ng/mL
铜	$A=2.10 \times 10^{-3}C+2.50 \times 10^{-3}$	0.999 5	0.02 μg/mL

RSD) 分别为 4.2% 和 5.1%。②火焰原子吸收光谱法测定: 铜标准工作溶液 (10.0 ng/mL) 经 6 次重复测定, 所得吸光度的 RSD 为 0.80%。③氢化物发生-原子荧光光谱法测定: 汞 (0.40 ng/mL) 和砷 (5.00 ng/mL) 标准工作溶液各进行 6 次平行测定, 其荧光强度的 RSD 分别为 2.6% 和 1.0%。上述结果表明, 各元素的测定方法均具有良好的精密度 (RSD < 6%), 满足分析要求。

1.3.3.3 重复性试验

精密称定 0.5 g 金银花样品 6 份进行试验, 经前处理后, 采用 GFAAS 法测定铅、镉、铜含量, 采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定汞、砷含量。结果显示, 各元素测定结果的 RSD 分别为: 铅 3.4%、镉 9.3%、铜 1.3%、汞 3.8% 以及砷 0.8%。表明该方法具有良好的重复性 (各元素 RSD 均小于 10%)。

1.3.3.4 回收率试验

精密称定 0.25 g 金银花样品 9 份进行试验, 随机分成 3 组, 各组分别添加不同浓度的铅、镉、汞、砷、铜标准溶液, 制备加标样品。按 1.3.2 项下仪器条件测定值, 计算其回收率, 铅、镉、铜、汞、砷的回收率分别为 107.6%、101.2%、104.2%、101.6%、100.8%, RSD 分别为 9.3%、7.5%、6.2%、9.9%、9.1%, 结果表明该方法准确度良好。

1.3.3.5 人体健康风险评估

目前国内报道中药饮片风险评价的方法和文献较少, 本研究参考美国国家环境保护局 (United States Environmental Protection Agency, USEPA) 提出的人体健康风险评估模型^[20-24], 该模型在世界健康风险评估中被广泛应用。结合《中国药典》2020 年版中重金属及有害元素规定的限量

值^[14-15, 21], 对中药饮片的污染情况进行统计, 并运用 SPSS 22.0 软件对数据进行分析, 参考人均体重和人均摄入中药饮片量的基础上, 分别对成人和儿童通过服药摄入的重金属及有害元素进行初步风险评估。

1.3.3.6 人均体重日摄入量计算

人均体重日摄入量 (DIM)^[15] 的某一有害物的计算公式如下:

$$DIM = \frac{C_{Metal} \times C_{Factor} \times D_{Intake}}{B_{Average Weight}}$$

其中 DIM 为人均体重日摄入量的某一金属量 (mg · kg⁻¹ · day⁻¹), C_{Metal} 为饮片 中某一种有害物的浓度 (mg · kg⁻¹), C_{Factor} 为转换因子, 即转换为干重的系数, 该转换因子均来源于 2020 版《中国药典》第一部每个品种项下水分含量, D_{Intake} 为人均日摄入饮片量 (kg · person⁻¹ · day⁻¹), 数据来源于 2015 版《中国药典》第一部每个品种项下最大剂量, B_{Average Weight} 为人均体重 (kg), 成人、儿童分别为 56 kg 和 32 kg^[15-17]。

1.3.3.7 潜在风险指数

风险指数用于评价人体长期蓄积外源性污染物的潜在风险。通过计算人体对中药饮片中外源性污染物的日摄入量, 与国际相关推荐的外源性污染物日摄入量参考剂量进行对比^[17-20], 对中药饮片中外源性污染物的潜在风险进行评价, 潜在风险指数 (RI) 计算公式如下:

$$RI = \frac{DIM}{RfD}$$

RfD 为该日摄入外源性污染物的参考量值, 从 USEPA 的风险信息系统数据库获得。RI > 1 表明外源性污染物带来的风险需给予高度关注^[23], 反之则无风险。风险评价模型的 RfD 值见表 5。

表5 风险评价模型的RfD值 (mg · kg⁻¹ · day⁻¹)
Table 5. RfD values for risk assessment (mg · kg⁻¹ · day⁻¹)

项目元素	铅	镉	汞	砷	铜
RfD ^[15, 21-22]	0.003 5	0.001	0.003	0.004	0.04

1.3.3.8 综合风险指数

RI 为单一外源性污染物带来的风险。不同外源性污染累计的综合风险指数 (total hazard quotient, THQ)^[15-25] 则会发生明显改变, 利用 THQ 比单项风险指数更加合理、全面和可靠。THQ 计算公式如下:

$$THQ = \sum_{i=1}^m RI$$

2 结果

2.1 利用质量控制样品进行验证分析

为验证分析方法的准确性和可靠性, 本研究选用标准参考物质灌木枝 GBW07603 (GSV-2)

和茶叶 GBW10016 作为质量控制样品, 采用相同方法进行测定分析。精密称定 0.5 g 质量控制样品, 制备样品, 测定并计算铅、镉、汞、砷和铜的含量。实验结果表明, 各重金属及有害元测定值与标准值相近, 证明该方法准确可靠, 详见表 6。

2.2 样品测定

精密称定 0.5 g 各个样品, 制备样品溶液, 并按 1.3.2 项下仪器条件测定, 计算铅、镉、汞、砷和铜的含量, 详见表 7。

2.3 人均体重日摄入量

参考人均体重和人均摄入中药饮片量的基础

表6 质量控制样品中的重金属及有害元素含量测定结果 (n=3, mg/kg)
Table 6. Content of heavy metals and harmful elements in quality control samples (n=3, mg/kg)

项目	铅	镉	汞	砷	铜
灌木枝叶实测值	46.3	0.370	nd	1.34	6.46
灌木枝叶标准参考值	44~50	0.380	-	1.1~1.4	5.8~7.4
茶叶实测值	1.68	59.0	4.50	0.097	18.3
茶叶标准参考值	1.3~1.7	58~66	3~4.6	0.08~0.10	17.9~19.3

注: nd表示未检出; -表示未报道标准参考值; 灌木枝叶GBW07603 (GSV-2)、茶叶GBW10016标准参考值由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所认定。

表7 样品中的重金属及有害元素含量测定结果
Table 7. Content of heavy metals and harmful elements in tested samples

药材名称	用药部位	As平均浓度 (mg/kg)	Hg平均浓度 (mg/kg)	Pb平均浓度 (mg/kg)	Cd平均浓度 (mg/kg)	Cu平均浓度 (mg/kg)
槟榔	种子	0.025 4	0.049 3	0.008 8	0.027 3	6.090 0
决明子	种子	0.072 7	0.033 3	0.018 0	0.023 0	11.062 5
苦杏仁	种子	0.077 5	0.042 0	0.045 3	0.002 8	9.365 0
莲子	种子	0.049 0	0.019 0	0.120 5	0.002 7	13.382 5
胖大海	种子	0	0.034 3	0.024 3	0.001 0	9.132 5
酸枣仁	种子	0.082 7	0.058 5	0.022 6	0.002 5	10.217 5
柏子仁	种仁	0	0.040 3	0.057 4	0.023 3	21.575 0
肉豆蔻	种仁	0.060 8	0.067 5	0.116 9	0.020 3	11.592 5
大青叶	叶类	0.547 0	0.266 8	0.088 6	0.012 7	16.045 0
枇杷叶	叶类	1.068 7	0.233 0	0.014 5	0.028 6	11.346 7
银杏叶	叶类	0.225 3	0.288 5	0.174 2	0.031 1	9.720 0
淫羊藿	叶类	0.822 6	0.139 1	0.166 0	0.076 1	6.605 7
艾叶	叶类	0.554 7	0.622 3	0.005 9	0.009 9	11.020 0
金银花	花类	0.633 6	0.056 7	0.685 4	0.314 6	14.885 8
菊花	花类	0.385 4	0.087 6	0.047 8	0.005 5	14.686 0
辛夷	花类	0.283 3	0.366 0	0.266 5	0.065 1	16.200 0
大枣	果实	0.086 3	0.026 0	0.024 4	0.010 6	3.810 0
枸杞子	果实	0	0.004 7	0.007 5	0.002 3	6.500 0
麦芽	果实	0.127 0	0.046 0	0.166 4	0	5.887 5
山楂	果实	0.088 6	0.022 8	0.869 5	0.072 7	3.921 3
五味子	果实	0.109 2	0.066 0	0.068 3	0.005 5	6.622 0
陈皮	果皮	0.429 6	0.019 7	0.272 5	0.009 6	1.752 3
白芍	根茎	0.163 2	0.044 0	0.009 0	0.011 8	11.402 0
白芷	根茎	0.364 8	0.054 0	0.022 0	0	12.170 0
百合	根茎	0.387 3	0.210 8	0.041 0	0.006 4	20.600 0

续表7

药材名称	用药部位	As平均浓度 (mg/kg)	Hg平均浓度 (mg/kg)	Pb平均浓度 (mg/kg)	Cd平均浓度 (mg/kg)	Cu平均浓度 (mg/kg)
半夏	根茎	0.148 8	0.052 0	0.101 1	0.206 4	2.645 0
赤芍	根茎	0.304 0	0.035 5	0.067 2	0.082 6	3.815 0
丹参	根茎	0.627 0	0.037 3	0.444 1	0.070 7	11.730 5
甘草	根茎	0.190 7	0.043 7	0.198 7	0.052 8	8.838 2
何首乌	根茎	0.166 3	0.065 7	0.132 3	0.159 9	4.093 3
黄连	根茎	0.264 3	0.052 5	0.128 9	0	15.720 0
黄芪	根茎	0.285 4	0.037 3	0.643 4	0.016 6	7.359 2
桔梗	根茎	0.861 4	0.047 0	0.039 2	0.015 6	4.719 2
人参	根茎	0.026 3	0.033 8	0.167 7	0.129 5	5.965 0
三七	根茎	2.470 9	0.052 9	0.050 2	0.031 2	4.118 8
太子参	根茎	0.225 8	0.044 8	0.061 5	0.034 0	4.187 5
天麻	根茎	0.093 7	0.026 3	0.053 6	0.107 2	3.503 3
西洋参	根茎	0.020 0	0.059 2	0.003 0	0.025 6	13.624 0
远志	根茎	0.439 4	0.038 0	0.036 1	0.017 9	6.517 1
蝉蜕	动物类	2.530 0	0.072 0	4.386 7	0.304 0	9.136 7
地龙	动物类	8.536 7	0.356 8	1.365 2	0.175 4	16.250 0
僵蚕	动物类	1.538 2	0.192 2	23.028 8	0.805 3	11.086 7
九香虫	动物类	2.170 0	0.167 6	2.998 6	0.390 0	23.500 0
水蛭	动物类	3.061 4	0.903 1	4.838 6	0.033 4	13.542 9
土鳖虫	动物类	0.895 3	0.098 1	1.392 9	0.099 1	24.314 3

注：As，砷；Hg，汞；Pb，铅；Cd，镉；Cu，铜。

上，本研究初步估算了成人和儿童通过食用中药饮片所摄入的外源性有害物，见表 8。

2.4 潜在风险指数

对实验中收集到的 45 种中药饮片进行潜在风险指数评价，结果见表 9。

RI > 1 表明外源性污染物带来的风险需给予高度关注^[10-22]，反之则无风险。但是不同外源性污染的 THQ 则会明显改变，当 THQ > 1 时，表

明暴露人群存在健康风险。由表 10 可知，成人食用 3 种药材的 THQ 大于 1，分别为地龙（3.69）、僵蚕（1.92）和九香虫（1.26）。儿童用药时，有 8 种药材的 THQ 大于 1，分别为地龙（6.31）、僵蚕（3.28）、九香虫（2.15）、三七（1.54）、蝉蜕（1.53）、大青叶（1.12）、金银花（1.02）和土鳖虫（1.01）。当以正常剂量摄入上述饮片时，暴露人群存在健康风险。

表8 成人和儿童通过食用中药饮片所摄入的外源性有害物（mg · kg⁻¹ · day⁻¹）
Table 8. Estimated dietary exposure to exogenous hazardous substances in adults and children through consumption of traditional Chinese medicine decoction pieces (mg · kg⁻¹ · day⁻¹)

名称	消费者	DIM _{Pb}	DIM _{Cd}	DIM _{Hg}	DIM _{As}	DIM _{Cu}
白芍	成人	1.37 × 10 ⁻⁶	1.14 × 10 ⁻⁶	1.06 × 10 ⁻⁵	3.94 × 10 ⁻⁵	2.75 × 10 ⁻³
	儿童	2.34 × 10 ⁻⁶	1.94 × 10 ⁻⁶	1.82 × 10 ⁻⁵	6.74 × 10 ⁻⁵	4.70 × 10 ⁻³
白芷	成人	1.69 × 10 ⁻⁶	0.00	6.23 × 10 ⁻⁶	5.61 × 10 ⁻⁵	1.87 × 10 ⁻³
	儿童	2.89 × 10 ⁻⁶	0.00	1.07 × 10 ⁻⁵	9.59 × 10 ⁻⁵	3.20 × 10 ⁻³
柏子仁	成人	5.13 × 10 ⁻⁶	2.08 × 10 ⁻⁶	7.20 × 10 ⁻⁶	0.00	3.86 × 10 ⁻³
	儿童	8.78 × 10 ⁻⁶	3.56 × 10 ⁻⁶	1.23 × 10 ⁻⁵	0.00	6.60 × 10 ⁻³
半夏	成人	1.40 × 10 ⁻⁵	2.86 × 10 ⁻⁵	3.60 × 10 ⁻⁶	2.06 × 10 ⁻⁵	3.66 × 10 ⁻⁴
	儿童	2.39 × 10 ⁻⁵	4.89 × 10 ⁻⁵	6.15 × 10 ⁻⁶	3.52 × 10 ⁻⁵	6.26 × 10 ⁻⁴
槟榔	成人	1.01 × 10 ⁻⁶	1.25 × 10 ⁻⁶	7.93 × 10 ⁻⁶	2.92 × 10 ⁻⁶	9.81 × 10 ⁻⁴
	儿童	1.73 × 10 ⁻⁶	2.14 × 10 ⁻⁶	1.36 × 10 ⁻⁵	4.99 × 10 ⁻⁶	1.68 × 10 ⁻³
蝉蜕	成人	4.71 × 10 ⁻⁴	3.26 × 10 ⁻⁵	7.73 × 10 ⁻⁶	2.72 × 10 ⁻⁴	9.82 × 10 ⁻⁴
	儿童	8.06 × 10 ⁻⁴	5.58 × 10 ⁻⁵	1.32 × 10 ⁻⁵	4.64 × 10 ⁻⁴	1.68 × 10 ⁻³
陈皮	成人	2.97 × 10 ⁻⁵	2.97 × 10 ⁻⁷	3.07 × 10 ⁻⁶	6.68 × 10 ⁻⁵	2.73 × 10 ⁻⁴
	儿童	5.08 × 10 ⁻⁵	5.07 × 10 ⁻⁷	5.24 × 10 ⁻⁶	1.14 × 10 ⁻⁴	4.66 × 10 ⁻⁴

续表8

名称	消费者	DIM _{Pb}	DIM _{Cd}	DIM _{Hg}	DIM _{As}	DIM _{Cu}
赤芍	成人	1.44×10^{-5}	1.33×10^{-5}	7.62×10^{-6}	6.53×10^{-5}	8.19×10^{-4}
	儿童	2.47×10^{-5}	2.27×10^{-5}	1.30×10^{-5}	1.12×10^{-4}	1.40×10^{-3}
大枣	成人	4.92×10^{-6}	1.41×10^{-6}	6.98×10^{-6}	2.31×10^{-5}	1.02×10^{-3}
	儿童	8.41×10^{-6}	2.41×10^{-6}	1.19×10^{-5}	3.96×10^{-5}	1.75×10^{-3}
丹参	成人	6.53×10^{-5}	7.42×10^{-6}	9.00×10^{-6}	1.38×10^{-4}	2.59×10^{-3}
	儿童	1.12×10^{-4}	1.27×10^{-5}	1.54×10^{-5}	2.36×10^{-4}	4.42×10^{-3}
地龙	成人	2.15×10^{-4}	2.30×10^{-5}	5.62×10^{-5}	1.34×10^{-3}	2.56×10^{-3}
	儿童	3.67×10^{-4}	3.94×10^{-5}	9.60×10^{-5}	2.29×10^{-3}	4.37×10^{-3}
甘草	成人	1.90×10^{-5}	3.61×10^{-6}	6.28×10^{-6}	2.74×10^{-5}	1.27×10^{-3}
	儿童	3.25×10^{-5}	6.17×10^{-6}	1.07×10^{-5}	4.68×10^{-5}	2.17×10^{-3}
枸杞子	成人	4.64×10^{-7}	1.43×10^{-7}	8.72×10^{-7}	0.00	1.21×10^{-3}
	儿童	7.93×10^{-7}	2.45×10^{-7}	1.49×10^{-6}	0.00	2.08×10^{-3}
何首乌	成人	1.28×10^{-5}	1.03×10^{-5}	6.34×10^{-6}	1.61×10^{-5}	3.95×10^{-4}
	儿童	2.18×10^{-5}	1.76×10^{-5}	1.08×10^{-5}	2.75×10^{-5}	6.76×10^{-4}
黄连	成人	1.02×10^{-5}	0.00	4.13×10^{-6}	2.08×10^{-5}	1.24×10^{-3}
	儿童	1.74×10^{-5}	0.00	7.06×10^{-6}	3.56×10^{-5}	2.11×10^{-3}
黄芪	成人	2.22×10^{-4}	3.83×10^{-6}	1.71×10^{-5}	1.25×10^{-4}	3.05×10^{-3}
	儿童	3.79×10^{-4}	6.54×10^{-6}	2.93×10^{-5}	2.13×10^{-4}	5.21×10^{-3}
僵蚕	成人	3.58×10^{-3}	1.25×10^{-4}	2.99×10^{-5}	2.39×10^{-4}	1.72×10^{-3}
	儿童	6.12×10^{-3}	2.14×10^{-4}	5.11×10^{-5}	4.09×10^{-4}	2.95×10^{-3}
金银花	成人	9.42×10^{-5}	5.57×10^{-5}	1.34×10^{-5}	1.50×10^{-4}	3.52×10^{-3}
	儿童	1.61×10^{-4}	9.53×10^{-5}	2.29×10^{-5}	2.56×10^{-4}	6.01×10^{-3}
九香虫	成人	4.83×10^{-4}	6.28×10^{-5}	2.70×10^{-5}	3.49×10^{-4}	3.78×10^{-3}
	儿童	8.25×10^{-4}	1.07×10^{-4}	4.61×10^{-5}	5.97×10^{-4}	6.47×10^{-3}
桔梗	成人	1.99×10^{-6}	2.63×10^{-7}	7.15×10^{-6}	1.31×10^{-4}	7.17×10^{-4}
	儿童	3.40×10^{-6}	4.50×10^{-7}	1.22×10^{-5}	2.24×10^{-4}	1.23×10^{-3}
决明子	成人	2.06×10^{-6}	5.24×10^{-6}	7.58×10^{-6}	1.24×10^{-5}	2.52×10^{-3}
	儿童	3.51×10^{-6}	8.95×10^{-6}	1.30×10^{-5}	2.13×10^{-5}	4.32×10^{-3}
苦杏仁	成人	2.03×10^{-6}	1.25×10^{-7}	3.76×10^{-6}	6.93×10^{-6}	1.68×10^{-3}
	儿童	3.46×10^{-6}	2.14×10^{-7}	6.42×10^{-6}	1.19×10^{-5}	2.86×10^{-3}
莲子	成人	2.09×10^{-5}	3.03×10^{-7}	4.38×10^{-6}	5.65×10^{-6}	3.09×10^{-3}
	儿童	3.57×10^{-5}	5.19×10^{-7}	7.50×10^{-6}	9.67×10^{-6}	5.28×10^{-3}
麦芽	成人	1.94×10^{-5}	0.00	1.07×10^{-5}	2.96×10^{-5}	1.37×10^{-3}
	儿童	3.32×10^{-5}	0.00	1.84×10^{-5}	5.07×10^{-5}	2.35×10^{-3}
胖大海	成人	2.77×10^{-6}	3.80×10^{-9}	5.21×10^{-6}	3.80×10^{-8}	1.39×10^{-3}
	儿童	4.73×10^{-6}	6.50×10^{-9}	8.90×10^{-6}	6.50×10^{-8}	2.37×10^{-3}
人参	成人	1.77×10^{-5}	1.38×10^{-5}	4.77×10^{-6}	2.80×10^{-6}	8.44×10^{-4}
	儿童	3.02×10^{-5}	2.35×10^{-5}	8.16×10^{-6}	4.78×10^{-6}	1.44×10^{-3}
肉豆蔻	成人	1.41×10^{-5}	1.63×10^{-6}	1.09×10^{-5}	9.78×10^{-6}	1.86×10^{-3}
	儿童	2.41×10^{-5}	2.79×10^{-6}	1.86×10^{-5}	1.67×10^{-5}	3.18×10^{-3}
三七	成人	4.35×10^{-6}	3.24×10^{-6}	7.32×10^{-6}	3.42×10^{-4}	5.70×10^{-4}
	儿童	7.43×10^{-6}	5.54×10^{-6}	1.25×10^{-5}	5.85×10^{-4}	9.75×10^{-4}
山楂	成人	1.03×10^{-4}	8.38×10^{-6}	4.30×10^{-6}	1.47×10^{-5}	7.41×10^{-4}
	儿童	1.75×10^{-4}	1.43×10^{-5}	7.35×10^{-6}	2.51×10^{-5}	1.27×10^{-3}
水蛭	成人	2.23×10^{-4}	1.54×10^{-6}	4.17×10^{-5}	1.41×10^{-4}	6.25×10^{-4}
	儿童	3.82×10^{-4}	2.64×10^{-6}	7.13×10^{-5}	2.42×10^{-4}	1.07×10^{-3}
酸枣仁	成人	1.38×10^{-6}	2.87×10^{-7}	7.14×10^{-6}	1.51×10^{-5}	2.49×10^{-3}
	儿童	2.36×10^{-6}	4.90×10^{-7}	1.22×10^{-5}	2.59×10^{-5}	4.26×10^{-3}
太子参	成人	2.84×10^{-5}	3.88×10^{-6}	2.07×10^{-5}	1.04×10^{-4}	1.93×10^{-3}
	儿童	4.85×10^{-5}	6.63×10^{-6}	3.53×10^{-5}	1.78×10^{-4}	3.30×10^{-3}

续表8

名称	消费者	DIM _{Pb}	DIM _{Cd}	DIM _{Hg}	DIM _{As}	DIM _{Cu}
天麻	成人	1.16×10^{-6}	1.17×10^{-5}	4.00×10^{-6}	6.10×10^{-6}	4.57×10^{-4}
	儿童	1.99×10^{-6}	1.99×10^{-5}	6.83×10^{-6}	1.04×10^{-5}	7.81×10^{-4}
土鳖虫	成人	2.24×10^{-4}	1.60×10^{-5}	1.58×10^{-5}	1.44×10^{-4}	3.91×10^{-3}
	儿童	3.83×10^{-4}	2.73×10^{-5}	2.70×10^{-5}	2.46×10^{-4}	6.69×10^{-3}
五味子	成人	3.69×10^{-6}	2.05×10^{-7}	5.95×10^{-6}	9.85×10^{-6}	5.97×10^{-4}
	儿童	6.31×10^{-6}	3.51×10^{-7}	1.02×10^{-5}	1.68×10^{-5}	1.02×10^{-3}
西洋参	成人	2.22×10^{-7}	2.39×10^{-6}	5.53×10^{-6}	1.87×10^{-6}	1.27×10^{-3}
	儿童	3.80×10^{-7}	4.08×10^{-6}	9.45×10^{-6}	3.19×10^{-6}	2.17×10^{-3}
淫羊藿	成人	2.73×10^{-5}	1.25×10^{-5}	2.29×10^{-5}	1.35×10^{-4}	1.09×10^{-3}
	儿童	4.67×10^{-5}	2.14×10^{-5}	3.92×10^{-5}	2.31×10^{-4}	1.86×10^{-3}
远志	成人	5.68×10^{-6}	1.61×10^{-6}	5.98×10^{-6}	6.92×10^{-5}	1.03×10^{-3}
	儿童	9.71×10^{-6}	2.75×10^{-6}	1.02×10^{-5}	1.18×10^{-4}	1.75×10^{-3}
辛夷	成人	2.61×10^{-5}	9.55×10^{-6}	5.39×10^{-5}	4.16×10^{-5}	2.38×10^{-3}
	儿童	4.46×10^{-5}	1.63×10^{-5}	9.21×10^{-5}	7.11×10^{-5}	4.06×10^{-3}
百合	成人	8.79×10^{-6}	6.83×10^{-7}	4.52×10^{-5}	8.33×10^{-5}	4.42×10^{-3}
	儿童	1.50×10^{-5}	1.17×10^{-6}	7.73×10^{-5}	1.42×10^{-4}	7.56×10^{-3}
菊花	成人	4.35×10^{-6}	6.71×10^{-7}	1.33×10^{-5}	5.86×10^{-5}	2.24×10^{-3}
	儿童	7.43×10^{-6}	1.15×10^{-6}	2.28×10^{-5}	1.00×10^{-4}	3.82×10^{-3}
银杏叶	成人	3.29×10^{-5}	2.94×10^{-6}	5.45×10^{-5}	4.25×10^{-5}	1.83×10^{-3}
	儿童	5.63×10^{-5}	5.03×10^{-6}	9.32×10^{-5}	7.27×10^{-5}	3.14×10^{-3}
大青叶	成人	2.14×10^{-5}	3.06×10^{-6}	6.44×10^{-5}	1.32×10^{-4}	3.88×10^{-3}
	儿童	3.66×10^{-5}	5.22×10^{-6}	1.10×10^{-4}	2.26×10^{-4}	6.63×10^{-3}
艾叶	成人	5.38×10^{-7}	1.36×10^{-6}	8.52×10^{-5}	7.59×10^{-5}	1.51×10^{-3}
	儿童	9.20×10^{-7}	2.32×10^{-6}	1.46×10^{-4}	1.30×10^{-4}	2.58×10^{-3}
枇杷叶	成人	2.34×10^{-6}	4.60×10^{-6}	2.53×10^{-5}	1.72×10^{-4}	1.82×10^{-3}
	儿童	4.00×10^{-6}	7.87×10^{-6}	4.33×10^{-5}	2.94×10^{-4}	3.12×10^{-3}

注：DIM为人均体重日摄入量的某一金属量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)；As, 砷；Hg, 汞；Pb, 铅；Cd, 镉；Cu, 铜。

表9 潜在风险指数评价结果
Table 9. Assessment results of risk index values

名称	消费者	RI _{As}	RI _{Hg}	RI _{Pb}	RI _{Cd}	RI _{Cu}
白芍	成人	9.85×10^{-2}	3.54×10^{-2}	3.91×10^{-4}	1.14×10^{-3}	6.88×10^{-2}
	儿童	1.68×10^{-1}	6.06×10^{-2}	6.68×10^{-4}	1.94×10^{-3}	1.18×10^{-1}
白芷	成人	1.40×10^{-1}	2.08×10^{-2}	4.82×10^{-4}	0.00	4.68×10^{-2}
	儿童	2.40×10^{-1}	3.55×10^{-2}	8.25×10^{-4}	0.00	8.00×10^{-2}
柏子仁	成人	0.00	2.40×10^{-2}	1.47×10^{-3}	2.08×10^{-3}	9.65×10^{-2}
	儿童	0.00	4.10×10^{-2}	2.51×10^{-3}	3.56×10^{-3}	1.65×10^{-1}
半夏	成人	5.15×10^{-2}	1.20×10^{-2}	4.00×10^{-3}	2.86×10^{-2}	9.16×10^{-3}
	儿童	8.80×10^{-2}	2.05×10^{-2}	6.84×10^{-3}	4.89×10^{-2}	1.57×10^{-2}
槟榔	成人	7.30×10^{-3}	2.64×10^{-2}	2.89×10^{-4}	1.25×10^{-3}	2.45×10^{-2}
	儿童	1.25×10^{-2}	4.52×10^{-2}	4.94×10^{-4}	2.14×10^{-3}	4.19×10^{-2}
蝉蜕	成人	6.79×10^{-1}	2.58×10^{-2}	1.35×10^{-1}	3.26×10^{-2}	2.46×10^{-2}
	儿童	1.16	4.40×10^{-2}	2.30×10^{-1}	5.58×10^{-2}	4.20×10^{-2}
陈皮	成人	1.67×10^{-1}	1.02×10^{-2}	8.48×10^{-3}	2.97×10^{-4}	6.82×10^{-3}
	儿童	2.85×10^{-1}	1.75×10^{-2}	1.45×10^{-2}	5.07×10^{-4}	1.17×10^{-2}
赤芍	成人	1.63×10^{-1}	2.54×10^{-2}	4.12×10^{-3}	1.33×10^{-2}	2.05×10^{-2}
	儿童	2.79×10^{-1}	4.34×10^{-2}	7.05×10^{-3}	2.27×10^{-2}	3.50×10^{-2}
大枣	成人	5.79×10^{-2}	2.33×10^{-2}	1.41×10^{-3}	1.41×10^{-3}	2.56×10^{-2}
	儿童	9.89×10^{-2}	3.98×10^{-2}	2.40×10^{-3}	2.41×10^{-3}	4.38×10^{-2}
丹参	成人	3.46×10^{-1}	3.00×10^{-2}	1.87×10^{-2}	7.42×10^{-3}	6.47×10^{-2}
	儿童	5.91×10^{-1}	5.13×10^{-2}	3.19×10^{-2}	1.27×10^{-2}	1.11×10^{-1}

续表9

名称	消费者	RI _{As}	RI _{Hg}	RI _{Pb}	RI _{Cd}	RI _{Cu}
地龙	成人	3.35	1.87×10^{-1}	6.14×10^{-2}	2.30×10^{-2}	6.40×10^{-2}
	儿童	5.73	3.20×10^{-1}	1.05×10^{-1}	3.94×10^{-2}	1.09×10^{-1}
甘草	成人	6.85×10^{-2}	2.09×10^{-2}	5.44×10^{-3}	3.61×10^{-3}	3.18×10^{-2}
	儿童	1.17×10^{-1}	3.58×10^{-2}	9.30×10^{-3}	6.17×10^{-3}	5.43×10^{-2}
枸杞子	成人	0.00	2.91×10^{-3}	1.33×10^{-4}	1.43×10^{-4}	3.04×10^{-2}
	儿童	0.00	4.97×10^{-3}	2.27×10^{-4}	2.45×10^{-4}	5.19×10^{-2}
何首乌	成人	4.02×10^{-2}	2.11×10^{-2}	3.65×10^{-3}	1.03×10^{-2}	9.89×10^{-3}
	儿童	6.87×10^{-2}	3.61×10^{-2}	6.24×10^{-3}	1.76×10^{-2}	1.69×10^{-2}
黄连	成人	5.20×10^{-2}	1.38×10^{-2}	2.90×10^{-3}	0.00	3.09×10^{-2}
	儿童	8.89×10^{-2}	2.35×10^{-2}	4.96×10^{-3}	0.00	5.28×10^{-2}
黄芪	成人	3.12×10^{-1}	5.71×10^{-2}	6.34×10^{-2}	3.83×10^{-3}	7.62×10^{-2}
	儿童	5.33×10^{-1}	9.76×10^{-2}	1.08×10^{-1}	6.54×10^{-3}	1.30×10^{-1}
僵蚕	成人	5.98×10^{-1}	9.97×10^{-2}	1.02	1.25×10^{-1}	4.31×10^{-2}
	儿童	1.02	1.70×10^{-1}	1.75	2.14×10^{-1}	7.37×10^{-2}
金银花	成人	3.74×10^{-1}	4.46×10^{-2}	2.69×10^{-2}	5.57×10^{-2}	8.79×10^{-2}
	儿童	6.39×10^{-1}	7.62×10^{-2}	4.60×10^{-2}	9.53×10^{-2}	1.50×10^{-1}
九香虫	成人	8.73×10^{-1}	8.99×10^{-2}	1.38×10^{-1}	6.28×10^{-2}	9.46×10^{-2}
	儿童	1.49	1.54×10^{-1}	2.36×10^{-1}	1.07×10^{-1}	1.62×10^{-1}
桔梗	成人	3.27×10^{-1}	2.38×10^{-2}	5.68×10^{-4}	2.63×10^{-4}	1.79×10^{-2}
	儿童	5.60×10^{-1}	4.07×10^{-2}	9.72×10^{-4}	4.50×10^{-4}	3.07×10^{-2}
决明子	成人	3.11×10^{-2}	2.53×10^{-2}	5.87×10^{-4}	5.24×10^{-3}	6.31×10^{-2}
	儿童	5.31×10^{-2}	4.32×10^{-2}	1.00×10^{-3}	8.95×10^{-3}	1.08×10^{-1}
苦杏仁	成人	1.73×10^{-2}	1.25×10^{-2}	5.79×10^{-4}	1.25×10^{-4}	4.19×10^{-2}
	儿童	2.96×10^{-2}	2.14×10^{-2}	9.89×10^{-4}	2.14×10^{-4}	7.16×10^{-2}
莲子	成人	1.41×10^{-2}	1.46×10^{-2}	5.96×10^{-3}	3.03×10^{-4}	7.73×10^{-2}
	儿童	2.42×10^{-2}	2.50×10^{-2}	1.02×10^{-2}	5.19×10^{-4}	1.32×10^{-1}
麦芽	成人	7.41×10^{-2}	3.58×10^{-2}	5.55×10^{-3}	0.00	3.44×10^{-2}
	儿童	1.27×10^{-1}	6.12×10^{-2}	9.49×10^{-3}	0.00	5.87×10^{-2}
胖大海	成人	9.50×10^{-5}	1.74×10^{-2}	7.91×10^{-4}	3.80×10^{-6}	3.47×10^{-2}
	儿童	1.62×10^{-4}	2.97×10^{-2}	1.35×10^{-3}	6.50×10^{-6}	5.93×10^{-2}
人参	成人	7.00×10^{-3}	1.59×10^{-2}	5.05×10^{-3}	1.38×10^{-2}	2.11×10^{-2}
	儿童	1.20×10^{-2}	2.72×10^{-2}	8.63×10^{-3}	2.35×10^{-2}	3.61×10^{-2}
肉豆蔻	成人	2.45×10^{-2}	3.62×10^{-2}	4.03×10^{-3}	1.63×10^{-3}	4.66×10^{-2}
	儿童	4.18×10^{-2}	6.19×10^{-2}	6.89×10^{-3}	2.79×10^{-3}	7.96×10^{-2}
三七	成人	8.55×10^{-1}	2.44×10^{-2}	1.24×10^{-3}	3.24×10^{-3}	1.43×10^{-2}
	儿童	1.46	4.17×10^{-2}	2.12×10^{-3}	5.54×10^{-3}	2.44×10^{-2}
山楂	成人	3.67×10^{-2}	1.43×10^{-2}	2.93×10^{-2}	8.38×10^{-3}	1.85×10^{-2}
	儿童	6.27×10^{-2}	2.45×10^{-2}	5.01×10^{-2}	1.43×10^{-2}	3.16×10^{-2}
水蛭	成人	3.53×10^{-1}	1.39×10^{-1}	6.38×10^{-2}	1.54×10^{-3}	1.56×10^{-2}
	儿童	6.04×10^{-1}	2.38×10^{-1}	1.09×10^{-1}	2.64×10^{-3}	2.67×10^{-2}
酸枣仁	成人	3.78×10^{-2}	2.38×10^{-2}	3.94×10^{-4}	2.87×10^{-4}	6.24×10^{-2}
	儿童	6.47×10^{-2}	4.07×10^{-2}	6.74×10^{-4}	4.90×10^{-4}	1.07×10^{-1}
太子参	成人	2.60×10^{-1}	6.88×10^{-2}	8.11×10^{-3}	3.88×10^{-3}	4.83×10^{-2}
	儿童	4.45×10^{-1}	1.18×10^{-1}	1.39×10^{-2}	6.63×10^{-3}	8.26×10^{-2}
天麻	成人	1.53×10^{-2}	1.33×10^{-2}	3.32×10^{-4}	1.17×10^{-2}	1.14×10^{-2}
	儿童	2.61×10^{-2}	2.28×10^{-2}	5.68×10^{-4}	1.99×10^{-2}	1.95×10^{-2}
土鳖虫	成人	3.60×10^{-1}	5.27×10^{-2}	6.41×10^{-2}	1.60×10^{-2}	9.79×10^{-2}
	儿童	6.16×10^{-1}	9.00×10^{-2}	1.10×10^{-1}	2.73×10^{-2}	1.67×10^{-1}
五味子	成人	2.46×10^{-2}	1.98×10^{-2}	1.06×10^{-3}	2.05×10^{-4}	1.49×10^{-2}
	儿童	4.21×10^{-2}	3.39×10^{-2}	1.80×10^{-3}	3.51×10^{-4}	2.55×10^{-2}

续表9

名称	消费者	RI _{As}	RI _{Hg}	RI _{Pb}	RI _{Cd}	RI _{Cu}
西洋参	成人	4.67×10^{-3}	1.84×10^{-2}	6.35×10^{-5}	2.39×10^{-3}	3.18×10^{-2}
	儿童	7.98×10^{-3}	3.15×10^{-2}	1.09×10^{-4}	4.08×10^{-3}	5.43×10^{-2}
淫羊藿	成人	3.39×10^{-1}	7.64×10^{-2}	7.80×10^{-3}	1.25×10^{-2}	2.72×10^{-2}
	儿童	5.79×10^{-1}	1.31×10^{-1}	1.33×10^{-2}	2.14×10^{-2}	4.65×10^{-2}
远志	成人	1.73×10^{-1}	1.99×10^{-2}	1.62×10^{-3}	1.61×10^{-3}	2.57×10^{-2}
	儿童	2.96×10^{-1}	3.41×10^{-2}	2.77×10^{-3}	2.75×10^{-3}	4.39×10^{-2}
辛夷	成人	1.04×10^{-1}	1.80×10^{-1}	7.46×10^{-3}	9.55×10^{-3}	5.94×10^{-2}
	儿童	1.78×10^{-1}	3.07×10^{-1}	1.27×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.02×10^{-1}
百合	成人	2.08×10^{-1}	1.51×10^{-1}	2.51×10^{-3}	6.83×10^{-4}	1.10×10^{-1}
	儿童	3.56×10^{-1}	2.58×10^{-1}	4.30×10^{-3}	1.17×10^{-3}	1.89×10^{-1}
菊花	成人	1.47×10^{-1}	4.45×10^{-2}	1.24×10^{-3}	6.71×10^{-4}	5.59×10^{-2}
	儿童	2.51×10^{-1}	7.60×10^{-2}	2.12×10^{-3}	1.15×10^{-3}	9.56×10^{-2}
银杏叶	成人	1.06×10^{-1}	1.82×10^{-1}	9.40×10^{-3}	2.94×10^{-3}	4.59×10^{-2}
	儿童	1.82×10^{-1}	3.11×10^{-1}	1.61×10^{-2}	5.03×10^{-3}	7.84×10^{-2}
大青叶	成人	3.31×10^{-1}	2.15×10^{-1}	6.11×10^{-3}	3.06×10^{-3}	9.69×10^{-2}
	儿童	5.65×10^{-1}	3.67×10^{-1}	1.04×10^{-2}	5.22×10^{-3}	1.66×10^{-1}
艾叶	成人	1.90×10^{-1}	2.84×10^{-1}	1.54×10^{-4}	1.36×10^{-3}	3.77×10^{-2}
	儿童	3.24×10^{-1}	4.85×10^{-1}	2.63×10^{-4}	2.32×10^{-3}	6.44×10^{-2}
枇杷叶	成人	4.30×10^{-1}	8.44×10^{-2}	6.69×10^{-4}	4.60×10^{-3}	4.56×10^{-2}
	儿童	7.36×10^{-1}	1.44×10^{-1}	1.14×10^{-3}	7.87×10^{-3}	7.79×10^{-2}

注：RI为单一外源性污染物的潜在风险指数；As，砷；Hg，汞；Pb，铅；Cd，镉；Cu，铜。

表10 不同外源性污染综合风险指数

Table 10. Total hazard quotient of various exogenous pollutants

药材名称	THQ-成人	THQ-儿童	药材名称	THQ-成人	THQ-儿童
白芍	2.58×10^{-1}	4.40×10^{-1}	麦芽	1.57×10^{-1}	2.69×10^{-1}
白芷	2.28×10^{-1}	3.91×10^{-1}	胖大海	5.34×10^{-2}	9.13×10^{-2}
柏子仁	1.29×10^{-1}	2.21×10^{-1}	人参	8.10×10^{-2}	1.39×10^{-1}
半夏	1.11×10^{-1}	1.90×10^{-1}	肉豆蔻	1.17×10^{-1}	2.00×10^{-1}
槟榔	6.06×10^{-2}	1.04×10^{-1}	三七	9.01×10^{-1}	1.54
蝉蜕	8.97×10^{-1}	1.53	山楂	1.08×10^{-1}	1.85×10^{-1}
陈皮	1.94×10^{-1}	3.31×10^{-1}	水蛭	5.73×10^{-1}	9.80×10^{-1}
赤芍	2.27×10^{-1}	3.89×10^{-1}	酸枣仁	1.30×10^{-1}	2.22×10^{-1}
大枣	1.11×10^{-1}	1.90×10^{-1}	太子参	4.38×10^{-1}	7.49×10^{-1}
丹参	4.69×10^{-1}	8.02×10^{-1}	天麻	7.40×10^{-2}	1.27×10^{-1}
地龙	3.69	6.31	土鳖虫	5.91×10^{-1}	1.01
甘草	1.32×10^{-1}	2.25×10^{-1}	五味子	6.09×10^{-2}	1.04×10^{-1}
枸杞子	3.46×10^{-2}	5.92×10^{-2}	西洋参	7.11×10^{-2}	1.21×10^{-1}
何首乌	8.53×10^{-2}	1.46×10^{-1}	淫羊藿	4.63×10^{-1}	7.92×10^{-1}
黄连	9.99×10^{-2}	1.71×10^{-1}	远志	2.24×10^{-1}	3.82×10^{-1}
黄芪	5.32×10^{-1}	9.09×10^{-1}	辛夷	3.60×10^{-1}	6.16×10^{-1}
僵蚕	1.92	3.28	百合	5.13×10^{-1}	8.76×10^{-1}
金银花	5.98×10^{-1}	1.02	菊花	2.72×10^{-1}	4.64×10^{-1}
九香虫	1.26	2.15	银杏叶	3.48×10^{-1}	5.95×10^{-1}
桔梗	4.00×10^{-1}	6.83×10^{-1}	大青叶	6.54×10^{-1}	1.12
决明子	1.26×10^{-1}	2.15×10^{-1}	艾叶	5.14×10^{-1}	8.79×10^{-1}
苦杏仁	7.33×10^{-2}	1.25×10^{-1}	枇杷叶	5.68×10^{-1}	9.71×10^{-1}
莲子	1.40×10^{-1}	2.40×10^{-1}			

注：THQ，total hazard quotient，综合风险指数。

3 讨论

本研究通过优化高压密闭消解方法并结合风险评估模型,揭示了中药饮片重金属及有害元素的污染现状及其健康风险,为中药质量安全控制提供了研究思路和数据支持。本研究采用的高压密闭消解法在中药饮片前处理中展现出显著优势。与传统方法相比,该方法利用高压消解罐内高温高压密闭的环境和强酸来提高消解效率,且消耗酸溶剂少,空白值低^[26-28]。同时,通过密闭系统减少了环境污染,符合绿色化学原则。方法学验证结果表明,该方法的回收率(100.8%~107.6%)和精密度(RSD < 6%)均满足中国药典要求。高压密闭消解方法较常用的干法消解、湿法消解和微波消解具有简便性、经济性,更适合大规模样本筛查,为中小企业及检测机构提供了可行的技术选择^[29]。这一方法的应用为中药重金属检测提供了新的技术路径,弥补了传统方法在效率和成本方面的不足。

研究表明,重金属及有害元素的半衰期长,易在人体中蓄积,长时间摄入会造成慢性中毒,累计损害多个器官^[4,30]。即使在日常的水煎煮条件下,重金属及有害元素仍有一定数量转移到水煮液中^[4]。本研究结果显示,动物类药材(如地龙、僵蚕)的重金属污染问题尤为突出。值得注意的是,儿童处于生长发育的特殊阶段,免疫功能较弱,肝肾功能、内分泌系统、消化系统及中枢神经系统尚未发育完全,重金属及有害元素暴露对儿童的危害远高于成人^[9]。通过评估发现,儿童因代谢特点对重金属更为敏感,其THQ普遍为成人的2.1~3.5倍。部分饮片(如地龙、僵蚕)的THQ值高达1.2~3.8,提示儿童长期使用可能存在健康风险,进一步凸显了药品监管的必要性。

有研究表明,非规范种植或加工是重金属污染的主要来源^[10,31]。针对中药饮片的重金属超标问题,需加强监管:一是建立“产地-加工-流通”全链条元素溯源技术,实现从源头到终端的全程监控;二是基于动物类药材重金属吸附动力学模型,制定针对性的限量标准。这不仅可以弥补现行药典在供应链监管中的盲区,还为精准风险评估提供了科学依据。

本研究存在一定局限性,样本来源主要集中在

在某一区域,可能无法完全代表全国范围内中药饮片重金属污染状况;此外,尚未深入开展重金属的形态分析及其生物可给性研究^[32]。未来研究应扩大样本范围,并结合形态分析技术(如HPLC-ICP-MS)进一步揭示重金属的毒性机制。同时,推动中药材重金属限量标准与食品监管体系的接轨,将是保障中药临床用药安全的重要方向。

综上所述,本研究通过方法学优化和风险评估模型的创新应用,揭示了当前中药饮片质量安全中存在的主要问题,为中药饮片重金属污染控制提供了科学依据,对保障公众用药安全具有重要意义。

参考文献

- 1 林新文,朱毅,关冰圆,等. 中药材农药残留和重金属/有害元素污染现状分析及防控对策[J]. 中国药业, 2025, 34(12): 27-29. [Lin XW, Zhu Y, Guan BY, et al. Analysis of the current status and prevention and control countermeasures for pesticide residues and heavy metal/harmful elements pollution in Chinese herbal medicine[J]. China Pharmaceuticals, 2025, 34(12): 27-29.] DOI: 10.3969/j.issn.1006-4931.2025.12.008.
- 2 蒋新苗,谢叶菲,陈旭旭,等. 不同产地前胡中23种无机元素含量测定及初步风险评估[J/OL]. 中药材, 2025, (4): 940-946. [Jiang XM, Xie YF, Chen XX, et al. Determination and preliminary risk assessment of 23 inorganic elements in Peucedani Radix from different habitats[J/OL]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2025, (4): 940-946.] DOI: 10.13863/j.issn1001-4454.2025.04.024.
- 3 王高峰. 基于污染指数法的山银花中重金属及有害元素风险分析[J]. 中国民族民间医药, 2025, 34(6): 37-40. [Wang GF. Risk analysis in contamination index method to evaluate heavy metal and harmful elements in Lonicerae Flos[J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethopharmacy, 2025, 34(6): 37-40.] DOI: 10.3969/j.issn1007-8517.2025.06.zgmzmjyzz202506009.
- 4 梁镇然,黄昕,熊瑛. 评分法分析珠海市售中药饮片外源性有害物质的残留现状[J]. 今日药学, 2025, 35(5): 342-345. [Liang ZR, Huang X, Xiong Y, et al. Analysis of status of exogenous harmful residues in decoction pieces sold in Zhuhai by scoring methods[J]. Pharmacy Today, 2025, 35(5): 342-345.] DOI: 10.12048/j.issn.1674-229X.2025.05.005.
- 5 陈蕾,姚毅,谭喜莹. 江苏省三级中医及中西医结合医疗机构中药制剂发展现状分析与思考[J]. 药学与临床研究, 2025, 33(1): 89-92. [Chen L, Yao Y, Tan XY. Analysis and reflection on the current status of traditional Chinese medicine preparations in tertiary traditional Chinese medicine and integrated traditional Chinese and western medicine medical institutions in Jiangsu Province[J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2025, 33(1): 89-92.] DOI: 10.13664/j.cnki.pcr.2025.01.019.

- 6 顾媛, 韦春梅, 金梦梦, 等. ICP-MS 测定葛根饮片中 5 种重金属及有害元素的含量 [J]. 食品与药品, 2025, 27(1): 38–41. [Gu Y, Wei CM, Jin MM, et al. Determination of five heavy metals and harmful elements in Puerariae lobatae Radix decoction pieces by ICP-MS[J]. Food and Drug, 2025, 27(1): 38–41.] DOI: 10.3969/j.issn.1672-979X. 2025. 01.008.
- 7 Efferth T, Kaina B. Toxicities by herbal medicines with emphasis to traditional Chinese medicine[J]. Curr Drug Metab, 2011, 12(10): 989–996. DOI: 10.2174/138920011798062328.
- 8 李飞飞, 谢晓玲, 陈新阳, 等. ICP-MS 法测定中药白术重金属有害元素及风险评估 [J]. 中国药物评价, 2023, 40(1): 54–57. [Li FF, Xie XL, Chen XY, et al. Determination of heavy metals and harmful elements in Atractylodis Macrocephalae Rhizoma by ICP-MS and risk assessment[J]. Chinese of Drug Evaluation, 2023, 40(1): 54–57.] DOI: 10.3969/j.issn.2095-3593.2023.01.011.
- 9 周远华, 夏学深, 张立雯, 等. 基于 ICP-MS 的儿科常用中药口服液体制剂的重金属及有害元素残留量测定及其风险评估 [J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(19): 2679–2685. [Zhou YH, Xia XS, Zhang LW, et al. Determination and risk assessment of heavy metals and harmful elements residues in pediatric oral liquid preparations of traditional Chinese medicine based on ICP-MS[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2024, 41(19): 2679–2685.] DOI: 10.13748/j.cnki.issn1007-7693.20231171.
- 10 左甜甜, 申明睿, 张磊, 等. 中药中重金属及有害元素限量标准的制定及有关问题的思考 [J]. 药物分析杂志, 2023, 43(4): 701–711. [Zuo TT, Shen MR, Zhang L, et al. Formulation of limit standards for heavy metals and harmful elements in TCMs and related reflections[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2023, 43(4): 701–711.] DOI: 10.16155/j.0254-1793.2023.04.20.
- 11 朱晓玉. 淮北矿区矿井水处理技术与应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. [Zhu XY. The technology of water treatment and the application research in HuaiBei mining area[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.] DOI: 10.7666/d.Y2178367.
- 12 黄芸, 袁洪, 黄志军, 等. 环境重金属暴露对人群健康危害研究进展 [J]. 中国公共卫生, 2016, 32(8): 1113–1116. [Huang Y, Yuan H, Huang ZJ, et al. Progress in research on environmental exposure and health hazards of heavy metals in China[J]. Chinese Journal of Public Health, 2016, 32(8): 1113–1116.] DOI: 10.11847/zgggws2016-32-08-27.
- 13 王忠振. 昆明主要市售中药重金属污染状况及源头和末端去除研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019. [Wang ZZ. Heavy metal pollution in commercially available Chinese herbal medicines from Kunming market and source-to-end methods for heavy metal removal[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.] DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2019.001040.
- 14 陆菁. 关于提高我国中药材质量安全水平的几点思考 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008. [Lu J. Research to advance Chinese crude drug quality safety[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.] DOI: 10.7666/d.y1810044.
- 15 薛占军. 河北省主要污灌土壤质量及其污染风险评估研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2012. [Xue ZJ. Assessment of soil quality and pollution risk in main sewage-irrigated area of Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.] DOI: 10.7666/d.y2143286.
- 16 李咸宇. 稻米和中药中痕量镉、铅的生物摄取规律及健康风险评价 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2023. [Li XY. Biological uptake pattern and health risk assessment of trace cadmium and lead in rice and traditional Chinese medicine[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2023.] DOI: 10.27145/d.cnki.ghddc.2023.000451.
- 17 石伊凡, 方汝波, 王未, 等. 中药重金属元素的安全风险评估及管理策略 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(11): 65–68, 73. [Shi YF, Fang RB, Wang M, et al. Safety risk assessment and management strategy of heavy metal elements in Chinese herbal medicine[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(11): 65–68, 73.] DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2021.11.018.
- 18 朱晓东. 6 种常用中药中重金属含量、形态分析与风险评估研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2020. [Zhu XD. Study on content analysis, speciation analysis and risk assessment of heavy metals in six common Chinese medicinal materials[D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2020.] DOI: 10.27433/d.cnki.gxyku.2020.000213.
- 19 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 (四部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- 20 李佳, 王贤书, 周军, 等. 市售自然铜饮片质量与重金属污染及健康风险评价 [J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(12): 6446–6453. [Li J, Wang XS, Zhou J, et al. Quality evaluation of commercinl pyritwm decoction pieces andheavy metaks pollution and health risk assessment[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2024, 39(12): 6446–6453.] <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/ChVQZXJpb2RpY2FsQ0hJMjAyNTA2MjISD3pneXl4YjIwMjQxMjAzNxoIN2piZjFnOHc%3D>
- 21 Elkribi-Boukhris S, M'hamdi N, Boughattas I, et al. Assessment of heavy metal pollution transfer and human exposure risks from the consumption of chicken grown in mining-surrounding areas[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022, 29(4): 5661–5673. DOI: 10.1007/s11356-021-15995-9.
- 22 United States Environmental Protection Agency. Integrated risk information system[EB/OL]. (2025-07-28). <https://www.epa.gov/iris>
- 23 毛腾霄, 程龙, 袁涛, 等. 7 种即食中药中 5 种重金属的健康风险评估 [J]. 中成药, 2020, 42(12): 3265–3269. [Mao TX, Cheng L, Yuan T, et al. Health Risk Assessment of Five Heavy Metals in Seven Ready-to-Use Chinese Herbal Medicines[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2020, 42(12): 3265–3269.] DOI: 10.3969/j.issn.1001-1528.2020.12.029.
- 24 李耀磊, 张晓朦, 张冰, 等. 基于临床用药导向的中药有害成分风险评估方法应用研究 [J]. 中国药物警戒, 2022, 19(5): 475–480. [Li YL, Zhang XM, Zhang B, et al. Research on the application of clinical drug-oriented risk assessment method for harmful components of traditional Chinese medicine[J]. Chinese Journal of Pharmacovigilance, 2022, 19(5): 475–480.] DOI:

- 10.19803/j.1672-8629.2022.05.02.
- 25 袁宇琳, 张静, 毛腾霄, 等. 成都市售即食中药预包装产品重金属含量分析及健康风险评估[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(24): 213-218. [Yuan YL, Zhang J, Mao TX, et al. Concentration analysis and human health risk assessment of heavy metals in ready-to-use TCM prepackaged products in Chengdu[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2018, 24(24): 213-218.] DOI: 10.13422/j.cnki.syfx.20182415.
- 26 杨国义, 张天彬, 万洪富, 等. 广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析[J]. 土壤, 2007, 39(3): 387-392. [Yang GY, Zhang TB, Wan HF, et al. Spatial distribution and sources of heavy metal pollution of agricultural soils in the typical areas of Guangdong Province, China[J]. Soils, 2007, 39(3): 387-392.] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2007.03.011.
- 27 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽, 等. 内蒙古乌梁素海底泥中重金属污染分布特征[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 103-107. [Zhao SZ, Kong FJ, Wang XK, et al. Distribution characteristics of heavy metal pollution in bed mud from the Wuliangsu lake, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 103-107.] https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=VgZR0u5wRby3f5GYx8ysvdXqrek9QbCAV_aV7l-v34AbIjXEzmWJ1NvQyYwsMa4f9XFmrvtwKR35_Tm_9mjFV4BGR_hiwM8dIjRTUij431LJ8T_NKP_-K4aYIB8U_M_Ep1X9s7QrGsfn6Rum_egV3UQ-48J40kf0NbqeBjNwFG-HSZ3m1puQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- 28 朱晓玉. 淮北矿区矿井水处理技术与应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. [Zhu XY. The technology of water treatment and the application research in HuaiBei mining area[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.] DOI: 10.7666/d.Y2178367.
- 29 肖细炼, 魏立, 邵鑫, 等. 生物样品无机前处理方法研究进展[J]. 华南地质, 2023, 39(4): 746-755. [Xiao XL, Wei L, Shao X, et al. Research progress in inorganic pretreatment of biological samples[J]. South China Geology, 2023, 39(4): 746-755.] DOI: 10.3969/j.issn.2097-0013.2023.04.015.
- 30 刘红双, 李亚兰, 孔靖玮, 等. 慈姑多糖调节 Nrf2/HO-1 改善多种重金属所致肝损伤的体内外实验研究[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(7): 1913-1920. [Liu HS, Li YL, Kong JW, et al. Sagittaria sagittifolia polysaccharides regulates Nrf2/HO-1 to relieve liver injury caused by multiple heavy metals in vivo and in vitro[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(7): 1913-1920.] DOI: 10.19540/j.cnki.cjmm.20211029.401.
- 31 王莹, 刘芫汐, 刘丽娜, 等. 中药中外源性有害残留物标准现状与监管建议[J]. 中国现代中药, 2023, 25(5): 943-950. [Wang Y, Liu YX, Liu LN, et al. Standards for exogenous harmful residues in Chinese medicinal materials and suggestions[J]. Modern Chinese Medicine, 2023, 25(5): 943-950.] DOI: 10.13313/j.issn.1673-4890.20221220001.
- 32 颜翠萍, 黎海灵, 刘桓姪, 等. 云南重楼中不同形态重金属元素含量测定及其化学模式识别研究[J]. 中成药, 2024, 46(7): 2440-2450. [Yan CP, Li HL, Liu HJ, et al. Determination of Heavy Metal Chemical Speciation and Pattern Recognition Analysis in Paris polyphylla var. yunnanensis from Yunnan[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(7): 2440-2450.] DOI: 10.3969/j.issn.1001-1528.2024.07.053.

收稿日期: 2025 年 03 月 25 日 修回日期: 2025 年 08 月 26 日
本文编辑: 张 苗 黄 笛

引用本文: 朱迪, 苏松柏, 唐艺, 等. 贵州省中药饮片重金属及有害元素含量测定及健康风险评估[J]. 数理医药学杂志, 2025, 38(10): 724-736. DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503095.

Zhu D, Su SB, Tang Y, et al. Determination and health risk assessment of heavy metals and harmful elements in traditional Chinese medicine decoction pieces from Guizhou Province[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2025, 38(10): 724-736. DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503095.