

不同产地猫爪草中无机元素含量分析及健康风险评估

李娟¹ 耿晓桐¹ 姚伟杰² 周涛³ 毕晶晶¹

(1. 信阳农林学院药学院, 河南 信阳 464000; 2. 淮滨县农投公司, 河南 信阳 464400;
3. 淮滨县淮河生态农业发展投资有限公司, 河南 信阳 464400)

摘要: [目的] 研究不同产地猫爪草无机元素含量差异性、重金属和有害元素的安全性。[方法] 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对样品中的24种元素进行定量分析, 采用每日最大耐受摄入量(EDI)、靶标危害系数(THQ)、潜在致癌风险指数(CR)进行健康风险评估, 采用主因子分析法(PCA)和偏最小二乘判别分析(PLS-DA)进行产地鉴别分析和差异元素筛选。[结果] 25个不同产地猫爪草样品均含有丰富的人体所必需常量元素(K、Na、Ca、Mg)和微量元素(Fe、Cu、Zn、Cr、Mn、Ni、V、Co、Mo、Se); 重金属及有害元素中Pb、Cd、As、Hg、Cu的含量依次为: 0.63~0.51, 0.05~0.11, 0.26~0.62, 0.01~0.10, 32.96~167.25 mg/kg, 其中Cu含量超过《中国药典》(2020版)对植物药的限量。健康风险评估方面, EDI分析中, 全部或部分产地猫爪草中Cr、Al、Ni、Pb、As、Cu的成人及儿童每日最大耐受摄入量超过10%的每日暂定可耐受摄入量(PTDI), 部分超过PTDI值, 存在健康风险; THQ分析中, 全部或部分产地猫爪草中Cr、Al、Cu、As的成人及儿童靶标危害系数值超过标准THQ, 存在健康危害风险; CR分析中, Cd、As的潜在致癌风险指数以及Cd、As、Pb 3种重金属元素的总潜在致癌风险指数在 1×10^{-6} ~ 1×10^{-4} , 存在潜在致癌风险。PCA分析确定了V、Al、Cs、Co、As、Fe、Mn、Ti、Cr、Pb、K、Ni、Sr、Cu、Ag、Cd、Hg、Zn、Ca、Na、Mo、Mg、Se等为猫爪草的特征元素, PLS-DA分析确定K、Mg、Fe、Al 4种元素可作为猫爪草产地的有效溯源指标。[结论] 建立的方法可快速准确分析猫爪草无机元素的含量; 长期摄入猫爪草时, 应注意剂量和服用时间的控制, 降低Cr、Al、As、Cu、Ni、Pb、Cd等元素带来的健康风险。

关键词: 猫爪草; 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS); 化学计量法; 无机元素; 健康风险评估

Analysis of inorganic element content and health risk assessment of *Ranunculi ternati* radix from different origins

Li Juan¹ Geng Xiaotong¹ Yao Weijie² Zhou Tao³ Bi Jingjing¹

(1. School of Pharmacy, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. Huaibin County Agricultural Investment Enterprise Management Co., Ltd., Xinyang, Henan 464400, China; 3. Huaibin County Huaihe Ecological Agriculture Development Investment Co., Ltd., Xinyang, Henan 464400, China)

Abstract: [Objective] The variations in inorganic element content and the safety of heavy metals and harmful elements in *Ranunculi ternati* radix from different origins were investigated. [Methods] The quantitative analysis of 24 elements in the samples was performed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Health risk assessment was conducted using estimated daily intake (EDI), target hazard quotient (THQ), and carcinogenic risk (CR). Principal component analysis (PCA) and partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) were used for origin identification analysis and differential element screening. [Results] All 25 *Ranunculi ternati* radix samples

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 21702051); 河南省科技攻关项目(编号: 242102110202); 河南省重点研发专项(编号: 241111311400); 河南省重大科技专项(编号: 201111310900); 河南省青年骨干教师培养计划(编号: 2024GGJS154)

通信作者: 耿晓桐(1995—), 女, 信阳农林学院讲师, 硕士。E-mail: 825630046@qq.com

收稿日期: 2025-06-24 **改回日期:** 2026-05-02

引用格式: 李娟, 耿晓桐, 姚伟杰, 等. 不同产地猫爪草中无机元素含量分析及健康风险评估[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 28-41.

Citation: Li Juan, Geng Xiaotong, Yao Weijie, et al. Analysis of inorganic element content and health risk assessment of *Ranunculi ternati* radix from different origins[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 28-41.

from different origins contain abundant macronutrients (K, Na, Ca, and Mg) and micronutrients (Fe, Cu, Zn, Cr, Mn, Ni, V, Co, Mo, and Se) essential for the human body. The contents of heavy metals and harmful elements Pb, Cd, As, Hg, and Cu are 0.63~0.51, 0.05~0.11, 0.26~0.62, 0.01~0.10, and 32.96~167.25 mg/kg, respectively. Among them, the Cu content exceeds the limit for botanical drugs in the *Chinese Pharmacopoeia* (2020 edition). In terms of health risk assessment, the EDI analysis reveals that the estimated maximum daily intakes of Cr, Al, Ni, Pb, As, and Cu for adults and children from *Ranunculi ternati* radix in all or some origins exceed 10% of the provisional tolerable daily intake (PTDI), with some exceeding the PTDI value, indicating health risks. In the THQ analysis, the target hazard quotient values of Cr, Al, Cu, and As for adults and children from *Ranunculi ternati* radix in all or some origins exceed the standard THQ, indicating health hazard risks. In the CR analysis, the potential carcinogenic risk indices of Cd and As, as well as the total potential carcinogenic risk index of the three heavy metals Cd, As, and Pb, range from 1×10^{-6} to 1×10^{-4} , indicating potential carcinogenic risks. The PCA identifies elements such as V, Al, Cs, Co, As, Fe, Mn, Tl, Cr, Pb, K, Ni, Sr, Cu, Ag, Cd, Hg, Zn, Ca, Na, Mo, Mg, and Se as the characteristic elements of *Ranunculi ternati* radix. The PLS-DA identifies four elements, including K, Mg, Fe, and Al, as effective traceability indicators for the origin of *Ranunculi ternati* radix. **[Conclusion]** The established method can rapidly and accurately analyze the inorganic element contents in *Ranunculi ternati* radix. When *Ranunculi ternati* radix is ingested for a long term, attention should be paid to controlling the dosage and duration of administration to reduce the health risks caused by elements such as Cr, Al, As, Cu, Ni, Pb, and Cd.

Keywords: *Ranunculi ternati* radix; inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); chemometric method; inorganic element; health risk assessment

猫爪草为毛茛科植物小毛茛 *Ranunculus ternatus* Thunb. 的干燥块根,具有化痰散结、解毒消肿的功效^[1]。猫爪草作为治疗淋巴结结核的验方在民间流传很久,20世纪50年代逐渐被报道^[2],后开始广泛使用,因其具有显著的抗结核以及抗肿瘤作用而受到关注^[3]。除了用于中药处方和生产中成药,猫爪草在长江流域及以南地区有着悠久的食用历史,常以代茶饮、煲汤等形式制作药膳,用于慢性咽炎、肺结节、甲状腺结节等疾病的防治,尤其随着结节病的高发,其食用越来越广泛。

矿物质元素是植物体重要化学组成部分,参与酶促反应并具有调节植物代谢等功能,同时也是构成人体组织的重要部分,具有保持机体酸碱平衡、维持组织细胞渗透压、调节机体免疫力等作用^[4]。同时,中药材含有丰富矿物质元素,部分矿物质元素如Fe、Ca、Se等对人体有益;而过量地摄入如Pb、Cd、Hg、Cu、As等重金属元素会对人体肺、肾脏等造成损害^[5-6]。随着工业化发展,土壤污染风险增高,中药材种植过程中化肥、农药不规范使用,均可能带来重金属污染,尤其是根茎类药材^[7-8]。因此,了解猫爪草矿物质元素的多样性及含量对进一步探究猫爪草生理特性、营养价值和食用安全性具有重要意义。全山丛等^[9]利用原子吸收光谱法(AAS)测定了7个产地猫爪草的8种矿物质元素,发现铁、锰、锌的含量较高。陈军等^[10]采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定新疆、河南猫爪草中的常量及微量元素,发现猫爪草中K、Ca、Fe、Mg、Mn、Zn等元素的含量较丰富。目前有关猫爪草中无机元素测定较少,更甚少有关于其重金属、有害元素的健康风险评估研究。

电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定无机元素较AAS、ICP-AES法具有检出限低、灵敏度高,可分析痕量元素等优点。研究拟基于ICP-MS分析25个产地猫爪草中

24种元素含量,并采用每日最大耐受摄入量(EDI)、靶标危害系数(THQ)、潜在致癌风险指数(CR)3个指标对重金属及有害元素进行健康风险评估,同时采用主因子分析法(PCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA)进行产地鉴别分析和差异元素筛选,以期对猫爪草质量控制及服用安全性提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器

ICP-MS质谱仪:Agilent 8900型,美国Agilent公司;
微波消解仪:Ethos Up型,意大利Mailstone公司;
分析天平:AB135-S型,瑞士Mettler Toledo公司;
超纯水仪:Milli-Q型,美国Millipore公司。

1.2 材料

Mo、W、Ti、Ge、Pb、Bi多元素标准溶液:100 µg/mL,钢研纳克检测技术股份有限公司;

Ag、Al、As、Ba、Be、Ca、Cd、Co、Cr、Cs、Cu、Fe、Ga、K、Li、Mg、Mn、Na、Ni、Pb、Rb、Se、Sr、Tl、U、V、Zn多元素标准溶液:10 µg/mL,美国Agilent公司;

Bi、Ge、In、Li、Lu、Rh、Sc、Tb TCP-MS混合内标液:100 µg/mL,美国Agilent公司;

65%硝酸:优级纯,美国Merk公司;

水:超纯水;

猫爪草(样品见表1):经信阳农林学院药学院陈琼教授鉴定均为毛茛科植物小毛茛(*Ranunculus ternatus* Thunb.)的干燥块根。

1.3 方法

1.3.1 内标溶液制备 精密吸取Bi、Ge、In、Li、Lu、Rh、Sc、Tb ICP-MS混合内标液0.25 mL于500 mL量瓶中,加水稀释至刻度,得到50 µg/L混合内标溶液。

表 1 25 批猫爪草样品信息

Table 1 Information of 25 batches of *Ranunculi ternati* radix samples

编号	来源	生长状态	收集时间	编号	来源	生长状态	收集时间
S1	安徽六安	家种	2024 年 5 月	S14	河南正阳	家种	2025 年 9 月
S2	江西德安	家种	2024 年 5 月	S15	河南息县	野生	2025 年 9 月
S3	江苏南通	家种	2024 年 5 月	S16	河南淮滨	家种	2025 年 9 月
S4	广西玉林	野生	2024 年 4 月	S17	河南潢川	家种	2025 年 9 月
S5	河南信阳	家种	2024 年 5 月	S18	河南遂平	家种	2025 年 9 月
S6	广东清远	野生	2024 年 4 月	S19	广西钦州	野生	2025 年 10 月
S7	广东韶关	野生	2024 年 4 月	S20	广西桂林	野生	2025 年 10 月
S8	四川成都	野生	2024 年 4 月	S21	云南文山	野生	2025 年 10 月
S9	甘肃渭源	家种	2024 年 6 月	S22	贵州仁怀	家种	2025 年 10 月
S10	湖南益阳	野生	2024 年 5 月	S23	江苏茅山	家种	2025 年 10 月
S11	云南昆明	家种	2024 年 5 月	S24	四川宜宾	野生	2025 年 10 月
S12	安徽阜阳 1	野生	2025 年 9 月	S25	山东菏泽	家种	2025 年 10 月
S13	安徽阜阳 2	家种	2025 年 9 月				

1.3.2 对照品溶液制备 精密吸取 Hg 元素标准溶液,用 2% 硝酸溶液稀释,分别得到 50, 100, 250, 500, 1 000, 1 500, 2 000 ng/L 的系列对照品溶液。精密吸取 Mo、W、Ti、Ge、Pb、Bi 多元素标准溶液(用于 Pb 的测定)1 mL 于 20 mL 量瓶,用 2% 硝酸溶液定容,精密吸取 Ag、Al 等多元素标准溶液(用于 Hg、Pb 之外 22 种元素的测定)10 mL 于 20 mL 量瓶,用 2% 硝酸溶液定容,得到对照品溶液母液;再依次用 2% 硝酸溶液稀释得到 0, 1, 10, 20, 40, 100, 200, 400 μg/L 的 Pb 对照品溶液,以及 0, 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200 μg/L 的 Ag、Al 等 22 种元素对照品溶液。

1.3.3 供试品溶液的制备 精密称取猫爪草样品粉末 0.2 g,加 6 mL 硝酸,2 mL 盐酸,置微波消解罐中消解,0~10 min 温度由室温升至 120 ℃,维持 5 min,10~30 min 温度升至 200 ℃,维持 40 min;功率 1 800 W。待消解完成后,放冷,转移至 50 mL 量瓶中,用少量水洗涤消解罐 3 次,合并洗液于量瓶中,定容即得。同时,按上述步骤消解制备空白样品溶液和平行样品溶液。测定时,根据不同元素标准曲线线性范围稀释至合适浓度。

1.3.4 仪器参数 ICP-MS 射频功率 1 900 W;采样深度 10 mm;载气流量 1.05 L/min;泵速 30 r/min;峰型 3 点,重复 5 次;扫描模式为单四极杆;He 流量 5.5 mL/min;检测元素及质量数 ²³Na、²⁴Mg、²⁷Al、³⁹K、⁴⁰Ca、⁵¹V、⁵²Cr、⁵⁵Mn、⁵⁶Fe、⁵⁹Co、⁶⁰Ni、⁶³Cu、⁶⁶Zn、⁷⁵As、⁷⁹Se、⁸⁸Sr、⁹⁶Mo、¹⁰⁷Ag、¹¹²Cd、¹³³Cs、¹³⁷Ba、²⁰²Hg、²⁰⁵Tl、²⁰⁸Pb;使用前需进行调谐。

1.3.5 线性关系、检测限及定量限 取系列浓度的混合标准溶液进样,以标准元素溶液的浓度为横坐标、元素响应值为纵坐标,绘制标准曲线。重复测定空白溶液 11 次,以其响应值的 3 倍所对应的元素浓度作为检测限,以其响应值的 10 倍所对应的元素浓度作为定量限^[11]。

1.3.6 方法学考察

(1) 精密度试验:取混合元素标准品溶液,平行测定 6 次。

(2) 重复性试验:取同一批猫爪草供试品 6 份,按“1.3.3”项下方法制备供试品溶液,进样测定。

(3) 稳定性试验:取猫爪草供试品溶液,于 0, 2, 4, 6, 8 h 进样测定。

(4) 加样回收率试验:取 S5 样品 6 份,每份 0.1 g,精密称定,精密加入一定量多元素混合标准溶液,及 Hg 元素标准溶液,按照“1.3.3”条件消解,按“1.3.4”条件测定,计算回收率。

1.4 健康风险评估

1.4.1 每日最大可耐受摄入量(EDI)的计算 猫爪草虽未列入药食两用中药目录,但在民间有食用习惯,且重金属半衰期较长,因此,采用 EDI 作为健康风险评估的基本参数^[12],其计算方法详见文献^[13]。根据《中国药典》2020 年版(一部),猫爪草剂量为 10~30 g^[1],此处成人按每日最大剂量 0.03 kg 计,儿童按每日最小剂量 0.01 kg 计。

1.4.2 靶标危害系数法(THQ) 靶标危害系数是由美国环保局提出的用于评估人体摄取重金属风险的参数,其评价方法详见文献^[12]。人体平均体重参照国际标准成人体重为 55.9 kg,儿童为 32.7 kg。参照 USEPA 提供的参考剂量:As、Pb、Cu、Cr、Cd、Hg、Ni、Zn、Mn、Se 分别为 0.003, 0.004, 0.040, 1.500, 0.001, 0.000 3, 0.02, 0.3, 0.14, 0.005 mg/(kg·d)^[14-15],Al 暂无每日参考剂量,按每日暂定可耐受摄入量(PTDI)计算^[14]。由于重金属及有害元素对人体健康的影响是多元素共同作用,因此,有必要计算各元素危害系数之和 TTHQ^[16]。

1.4.3 致癌风险评估 暴露于致癌元素后患癌的概率可使用潜在致癌风险(CR)、综合潜在致癌风险(TCR)进行评估,具体方法详见文献[17]。

1.5 数据分析

利用SPSS 27.0软件,采用主因子分析法(PCA)对不同产地猫爪草中24种元素的特征值及方差贡献率进行综合分析。采用SIMCA14.1软件对25批猫爪草微量元素含量进行偏最小二乘判别分析(PLS-DA)建模分析,构建产地判别模型。

2 结果与分析

2.1 标准溶液检测

2.1.1 线性关系、检测限及定量限 由表2可知,各元素标准曲线的线性相关系数为0.999 8~1.000 0,表明各元素在曲线范围内线性关系良好。各元素检出限为0.000 6~6.599 5 μg/L,表明方法具有较高的灵敏度。各元素定量限为0.002 0~21.998 2 μg/L,表明该方法可以用于各元素的定量分析。

2.1.2 方法学验证 精密度试验各元素响应值相对标准

偏差(RSD)<4.0%,表明仪器精密度良好;重复性试验各元素RSD<4.0%,表明方法重复性良好;稳定性试验各元素RSD<4.0%,表明供试品溶液在8 h内稳定;各元素回收率为86.1%~112.8%,RSD<6.0%,表明该方法可以相对准确地测定猫爪草样品中各元素含量。

2.2 样品含量测定

对25个产地猫爪草中24种矿物元素的含量进行分析,结果见表3。所有样品中均检出24种矿物元素,且在不同产地猫爪草中均存在不同程度的差异性,仅Sr、Ag、Tl 3种元素含量差异性较小,说明不同产地猫爪草所含矿物元素具有一定的差异性。

25个产地猫爪草中人体必需常量元素K、Na、Ca、Mg的含量范围分别为8 089.66~11 008.24, 187.16~358.29, 198.55~350.98, 1 077.54~1 529.93 mg/kg,人体必需的微量元素Fe、Cu、Zn、Cr、Mn、Ni、V、Co、Mo、Se的含量范围分别为666.84~1 760.12, 32.96~167.25, 38.02~56.91, 23.34~53.16, 43.12~96.44, 7.16~16.17, 1.20~3.43, 0.40~1.14, 0.13~0.19, 0.10~0.61 mg/kg,说明猫爪草中部分元素在提供药用价值的同时,也为人体提供营养价值。

表2 24种元素的线性关系考察结果
Table 2 Investigation results of linear relationships for 24 elements

元素	回归方程	R ²	线性范围/(μg·L ⁻¹)	检出限/(μg·L ⁻¹)	定量限/(μg·L ⁻¹)
Na	Y=76.315X+3 771.9	1.000 0	0~200	1.050 0	3.500 0
Mg	Y=42.046X+65.018	0.999 8	0~200	6.393 4	21.311 2
Al	Y=917.66X+2 756.3	1.000 0	0~200	0.100 3	0.334 3
K	Y=30.727X+3 439.9	1.000 0	0~200	3.075 3	10.251 1
Ca	Y=96.44X+866.6	1.000 0	0~200	1.628 0	5.426 6
V	Y=1 420.2X+4	1.000 0	0~200	0.003 5	0.011 8
Cr	Y=2 074.4X+116	1.000 0	0~200	0.140 9	0.469 6
Mn	Y=694.64X+656.05	1.000 0	0~200	0.063 8	0.212 6
Fe	Y=1 623.6X+3 850.7	1.000 0	0~200	6.599 5	21.998 2
Co	Y=4 724.5X+38.668	1.000 0	0~200	0.011 9	0.039 5
Ni	Y=1 389.2X+286.68	1.000 0	0~200	0.275 1	0.917 0
Cu	Y=4 050X+6 503.9	1.000 0	0~200	3.400 0	11.333 4
Zn	Y=416.99X+1 138.9	1.000 0	0~200	1.785 7	5.952 3
As	Y=243.21X+1.4	1.000 0	0~200	0.014 8	0.049 3
Se	Y=839.8X-439.84	0.999 9	0~200	0.002 4	0.007 9
Sr	Y=730.58X+8	1.000 0	0~200	0.024 7	0.082 3
Mo	Y=1 686.9X+23.332	1.000 0	0~200	0.031 0	0.103 3
Ag	Y=7 856.7X+12.002	1.000 0	0~200	0.005 9	0.019 6
Cd	Y=777.1X+2.4	1.000 0	0~200	0.007 0	0.023 2
Cs	Y=2 212.3X-389.72	1.000 0	0~200	0.006 3	0.021 1
Ba	Y=517.32X+1.334	1.000 0	0~200	0.096 7	0.322 4
Hg	Y=3 101.3X+3.5	1.000 0	0~20	0.000 6	0.002 0
Tl	Y=1 7295X+53.336	1.000 0	0~200	0.004 7	0.015 6
Pb	Y=5 418.5X-9 486.4	0.999 8	0~400	0.477 6	1.592 0

表 3 猫爪草中无机元素的含量测定结果

Table 3 Determination results of inorganic elements in <i>Ranunculi ternati</i> radix (n=3)								mg/kg
样品	Na	Mg	Al	K	Ca	V	Cr	Mn
S1	325.91±23.77	1 397.69±55.71	726.31±28.95	10 910.05±220.52	314.05±15.38	1.65±0.10	33.45±3.01	43.12±3.35
S2	305.36±13.97	1 529.93±10.76	657.46±26.20	9 119.29±184.33	198.55±7.63	1.58±0.19	28.86±2.83	72.16±6.53
S3	234.13±7.18	1 318.94±61.33	1 128.47±44.98	9 504.32±192.11	243.39±10.21	2.45±0.13	41.12±4.12	96.44±7.78
S4	358.29±27.97	1 279.88±77.55	499.06±19.89	8 496.00±171.73	232.05±16.46	1.26±0.16	25.30±4.65	49.24±4.22
S5	306.44±28.28	1 343.58±45.43	1 082.27±43.14	9 860.78±199.32	334.45±10.95	2.25±0.14	25.50±2.60	51.14±5.05
S6	187.16±2.32	1 299.40±87.51	784.01±31.25	8 108.29±163.89	253.83±17.44	2.04±0.37	34.61±3.97	59.58±6.72
S7	350.48±21.58	1 397.16±43.73	1 633.19±65.09	9 161.34±185.18	201.59±13.09	3.43±0.42	53.16±6.24	69.73±6.48
S8	202.15±4.38	1 472.23±87.31	1292.75±51.52	8 991.90±181.75	274.56±10.12	2.76±0.26	34.16±3.25	60.60±4.62
S9	250.54±14.48	1 338.30±49.26	442.78±17.65	8 343.02±168.64	243.03±10.69	1.20±0.33	24.06±2.96	52.49±5.71
S10	226.74±8.41	1 232.08±54.03	847.91±33.79	8 138.00±164.49	211.46±4.03	1.89±0.12	37.56±3.36	48.16±2.78
S11	219.27±12.65	1 143.88±63.71	939.60±37.45	8 783.56±177.54	238.10±20.13	2.05±0.25	28.57±4.22	54.61±6.13
S12	302.69±17.84	1 326.05±92.70	679.10±27.07	9 786.32±197.81	292.97±13.48	1.56±0.10	30.31±3.48	46.68±4.10
S13	347.26±17.81	1 462.47±45.51	760.45±30.31	11 008.24±222.51	322.12±13.61	1.72±0.13	33.78±3.60	48.61±5.29
S14	291.50±21.70	1 314.00±61.10	1 032.49±41.15	9 969.25±201.51	305.11±15.19	2.16±0.15	26.08±2.56	54.79±5.30
S15	283.69±18.90	1 230.88±47.41	998.94±39.81	9 062.06±183.17	308.30±17.93	2.18±0.20	23.34±2.11	47.77±5.01
S16	319.41±23.77	1 379.85±52.23	1 102.83±43.95	10 097.44±204.10	329.13±13.16	2.28±0.14	26.21±2.58	50.61±4.17
S17	299.41±15.13	1 294.69±54.19	1 042.23±41.54	9 269.13±187.36	350.98±7.09	2.25±0.22	26.50±2.39	52.50±4.74
S18	319.58±26.30	1 390.63±52.64	1 127.73±44.95	10 028.41±202.70	337.57±14.76	2.42±0.30	27.97±3.25	55.60±5.47
S19	343.90±25.87	1 195.11±20.04	493.57±19.67	8 309.08±167.95	218.59±8.97	1.34±0.10	24.30±2.87	44.83±5.14
S20	342.46±22.03	1 210.07±16.94	504.55±20.11	8 215.63±166.06	227.99±10.83	1.28±0.08	29.41±3.57	45.51±4.84
S21	204.63±2.15	1 077.54±60.02	863.49±34.42	8 089.66±163.52	225.54±9.28	1.88±0.22	25.71±2.82	48.76±4.40
S22	203.65±8.91	1 103.10±54.21	962.15±38.35	8 511.27±172.04	231.73±7.37	1.99±0.24	28.54±2.88	48.58±5.49
S23	229.74±17.10	1 346.63±62.62	1 148.78±45.79	9 732.42±196.72	240.81±9.25	2.62±0.32	42.39±3.83	87.23±9.28
S24	200.45±16.05	1 447.98±74.97	1 164.76±46.42	8 263.55±167.03	255.18±9.63	2.48±0.27	29.87±3.08	54.34±5.34
S25	308.95±18.68	1 375.73±63.06	791.68±31.55	10 124.53±204.65	297.09±15.46	1.89±0.15	34.11±3.49	54.21±5.68
样品	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr
S1	880.00±58.13	0.42±0.04	8.33±0.69	40.25±3.29	45.87±3.65	0.34±0.05	0.22±0.00	12.75±0.78
S2	776.31±51.28	0.65±0.06	8.57±0.66	44.90±3.85	44.66±2.89	0.29±0.01	0.21±0.01	17.16±1.40
S3	1 242.26±82.06	1.14±0.10	13.34±0.85	79.83±6.23	40.26±2.05	0.43±0.03	0.43±0.01	14.21±1.10
S4	681.84±45.04	0.44±0.08	7.23±0.77	32.96±2.54	38.85±2.41	0.26±0.02	0.27±0.01	12.28±1.15
S5	1 204.87±79.59	0.56±0.06	13.19±1.53	87.83±7.75	42.41±2.45	0.49±0.05	0.61±0.01	13.56±1.72
S6	1 382.69±91.34	0.62±0.05	13.61±1.71	104.55±19.18	42.64±3.27	0.35±0.04	0.35±0.01	13.04±1.22
S7	1 760.12±116.27	0.87±0.09	12.74±1.31	72.06±6.42	40.17±4.20	0.62±0.07	0.37±0.01	13.68±1.12
S8	1 432.42±96.42	0.72±0.07	16.08±1.49	117.85±11.43	41.39±3.75	0.52±0.03	0.23±0.01	14.81±1.13
S9	766.66±50.65	0.49±0.06	15.08±1.72	167.25±57.51	41.16±3.73	0.27±0.06	0.10±0.01	14.28±1.19
S10	998.86±65.98	0.55±0.06	16.17±1.32	97.32±5.36	56.91±2.87	0.37±0.03	0.33±0.01	14.12±0.82
S11	1 105.55±73.03	0.59±0.06	14.30±1.66	75.79±8.70	41.73±4.82	0.40±0.07	0.19±0.01	13.43±1.84
S12	950.40±62.78	0.40±0.04	7.55±0.62	37.94±3.12	43.06±3.37	0.32±0.04	0.30±0.01	12.46±0.73
S13	1 074.49±70.98	0.47±0.04	8.35±0.89	41.96±2.80	47.07±4.29	0.39±0.03	0.27±0.01	13.20±1.03
S14	1 112.09±73.46	0.54±0.05	12.32±1.41	97.20±12.77	41.60±2.77	0.53±0.05	0.52±0.03	12.92±1.06
S15	1 409.69±93.12	0.51±0.05	11.65±1.29	76.81±6.02	43.49±4.59	0.45±0.05	0.54±0.02	13.53±0.90
S16	1 337.40±88.35	0.55±0.05	13.26±1.63	91.97±8.30	41.78±2.14	0.45±0.04	0.56±0.03	14.36±1.65
S17	1 362.70±90.02	0.62±0.06	13.31±1.58	92.17±12.11	42.97±3.33	0.49±0.02	0.51±0.03	13.41±0.79
S18	1 168.72±77.21	0.63±0.06	13.65±1.45	88.04±10.83	45.09±5.02	0.44±0.06	0.48±0.01	14.00±1.72
S19	666.84±44.05	0.41±0.03	7.16±0.70	41.31±4.40	40.42±4.67	0.33±0.04	0.31±0.00	13.32±1.71
S20	863.89±57.07	0.47±0.06	7.59±0.81	38.13±3.44	38.02±1.81	0.34±0.03	0.25±0.01	12.28±0.72

续表3

样品	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr
S21	1 349.88±89.17	0.53±0.05	12.67±1.56	66.60±5.48	39.91±2.35	0.33±0.05	0.23±0.01	13.17±0.88
S22	1 448.28±95.67	0.54±0.05	12.09±1.29	58.54±5.28	41.77±2.78	0.35±0.05	0.23±0.01	13.00±0.97
S23	1 408.72±93.06	1.01±0.09	13.09±1.61	70.47±6.36	40.88±3.36	0.46±0.05	0.48±0.02	14.45±1.19
S24	1 289.17±85.16	0.63±0.06	13.78±1.60	108.68±10.68	40.67±2.09	0.44±0.05	0.21±0.01	14.73±1.93
S25	800.80±52.90	0.50±0.04	8.10±0.86	50.47±7.49	45.49±2.68	0.35±0.02	0.30±0.01	12.90±1.69
样品	Mo	Ag	Cd	Cs	Ba	Hg	Tl	Pb
S1	0.17±0.03	0.02±0.00	0.08±0.02	0.13±0.02	31.37±0.90	0.04±0.01	0.03±0.01	1.51±0.15
S2	0.16±0.00	0.01±0.00	0.10±0.01	0.11±0.01	30.45±1.34	0.03±0.01	0.02±0.00	0.64±0.15
S3	0.15±0.04	0.02±0.01	0.11±0.01	0.19±0.01	37.12±0.51	0.10±0.01	0.03±0.01	1.02±0.17
S4	0.17±0.00	0.01±0.00	0.07±0.01	0.09±0.00	28.08±1.82	0.02±0.00	0.02±0.00	0.68±0.17
S5	0.17±0.01	0.02±0.01	0.05±0.01	0.19±0.01	29.45±3.16	0.03±0.00	0.02±0.00	1.19±0.53
S6	0.18±0.01	0.02±0.00	0.08±0.02	0.13±0.00	28.12±1.12	0.01±0.00	0.02±0.00	0.73±0.14
S7	0.16±0.01	0.02±0.01	0.06±0.00	0.28±0.01	34.00±2.04	0.03±0.01	0.02±0.00	1.16±0.11
S8	0.19±0.00	0.02±0.00	0.07±0.01	0.23±0.00	32.40±1.44	0.02±0.00	0.02±0.00	1.00±0.11
S9	0.15±0.02	0.02±0.00	0.08±0.00	0.09±0.01	33.04±4.78	0.02±0.00	0.02±0.00	0.63±0.22
S10	0.17±0.01	0.02±0.00	0.06±0.00	0.16±0.00	28.12±0.84	0.03±0.00	0.02±0.00	0.78±0.12
S11	0.13±0.01	0.01±0.00	0.07±0.00	0.18±0.01	27.99±2.07	0.02±0.00	0.02±0.00	0.90±0.26
S12	0.15±0.00	0.02±0.00	0.08±0.01	0.14±0.01	29.92±0.64	0.03±0.00	0.02±0.00	1.24±0.18
S13	0.18±0.01	0.02±0.00	0.09±0.01	0.15±0.01	31.86±1.66	0.04±0.00	0.02±0.00	1.46±0.17
S14	0.17±0.02	0.02±0.00	0.06±0.01	0.20±0.02	28.45±1.31	0.03±0.00	0.02±0.00	0.89±0.17
S15	0.17±0.01	0.02±0.00	0.05±0.01	0.18±0.01	29.31±1.48	0.02±0.00	0.02±0.00	0.80±0.12
S16	0.18±0.00	0.02±0.00	0.06±0.01	0.20±0.02	32.78±2.44	0.03±0.00	0.02±0.00	0.99±0.15
S17	0.17±0.01	0.02±0.00	0.06±0.01	0.18±0.02	32.21±2.40	0.03±0.00	0.02±0.00	0.86±0.10
S18	0.18±0.01	0.02±0.00	0.06±0.00	0.19±0.00	29.46±1.67	0.02±0.00	0.02±0.00	0.98±0.15
S19	0.16±0.01	0.02±0.00	0.07±0.00	0.10±0.00	28.00±1.02	0.02±0.00	0.02±0.00	0.63±0.13
S20	0.17±0.02	0.02±0.00	0.07±0.01	0.10±0.00	30.34±2.23	0.02±0.00	0.02±0.00	0.79±0.11
S21	0.15±0.00	0.02±0.00	0.07±0.01	0.15±0.01	26.72±0.58	0.02±0.00	0.02±0.00	0.74±0.15
S22	0.13±0.01	0.01±0.00	0.07±0.01	0.20±0.01	27.88±0.93	0.02±0.00	0.02±0.00	0.92±0.13
S23	0.15±0.01	0.02±0.01	0.09±0.01	0.21±0.00	36.14±2.97	0.07±0.01	0.03±0.00	0.96±0.18
S24	0.19±0.00	0.02±0.00	0.06±0.01	0.21±0.01	32.46±2.16	0.01±0.00	0.02±0.0	0.86±0.10
S25	0.17±0.00	0.02±0.00	0.07±0.01	0.14±0.01	29.21±1.06	0.03±0.00	0.02±0.00	1.17±0.20

Pb、Cd、As、Hg、Cu是常见的重金属和有害元素,虽然《中国药典》(2020年版)未对猫爪草有重金属及有害元素的限量检测要求,但猫爪草有大量的食用需求,因此对猫爪草进行了重金属及有害元素的限量分析。根据《中国药典》(2020年版)关于部分植物源中药重金属及有害元素一致性限量指导值($Pb \leq 5 \text{ mg/kg}$; $Cd \leq 0.3 \text{ mg/kg}$,部分药材 $\leq 1 \text{ mg/kg}$; $Hg \leq 0.2 \text{ mg/kg}$; $Cu \leq 20 \text{ mg/kg}$; $As \leq 2 \text{ mg/kg}$)^[18],25个产地猫爪草中Pb、Cd、Hg、As等重金属元素含量均符合《中国药典》限量要求,而作为人体必需微量元素但过量摄入又是有害元素的Cu,25个产地猫爪草含量均超过《中国药典》限量指导值。植物药Cu的来源主要有3种途径:药物自身富集,土壤的Cu污染和农药以及含Cu肥料的污染。收集的25个样品来源于全国不同地域,土壤环境差异较大,且有家种有野生,因此,猫爪

草Cu的高含量可能与其本身对Cu的富集作用有关。Cu虽是免疫细胞用来控制结核杆菌的抗菌金属元素^[19],巨噬细胞可以通过多种机制介导Cu对结核分枝杆菌的毒性作用^[20-21],Cu还参与包括抗结核分枝杆菌在内的感染免疫反应^[21-23],高含量的Cu可能有助于猫爪草发挥抗结核及抗感染作用,然而Cu过量会引起机体细胞铜死亡,造成机体代谢障碍^[24]。因此,有必要对猫爪草的重金属及有害元素的安全性和健康风险进行评估。

2.3 健康风险评估

2.3.1 EDI评估 不同产地猫爪草EDI计算结果见表4。通常将EDI与重金属及有害元素的每日暂定可耐受摄入量(PTDI)进行对比,若 $EDI > PTDI$,说明样品中所含重金属对人体健康有明显影响。根据世界卫生组织所属食品

添加剂委员会 (JECFA) 建议, Hg、Cu 的 PTDI 分别为 0.000 57, 0.500 00 mg/(kg·d)^[12], Cd 根据每月暂定可耐受摄入量 0.025 00 mg/kg 换算成每日耐受摄入量为 0.000 83 mg/(kg·d)^[12, 16], Pb、As、Ni、Cr、Zn、Al 依据文献其 PTDI 依次为 0.003 57, 0.002 14, 0.012 00, 0.003 00, 0.300 00, 0.285 70 mg/(kg·d)^[13, 16], 其中 Al 在儿童中的观测值最多可以为成人的两倍^[14], Se 的口服参考剂量按 USEPA 推荐值 0.005 00 mg/(kg·d)^[25]。美国国家卫生基金会 (NSF) 提出, 每日由膳食补充剂中摄入的污染元素量占日总暴露量不得超过 10%, 因此, 以 10% PTDI 值作为参考对猫爪草中重金属及有害元素的健康风险进行评估, 当 10% PTDI < EDI < PTDI 时, 可认为会造成健康危害风险, 但带来的健康危害风险有限^[14]。

根据表 4, Cr: 25 个不同产地猫爪草样品中, 成人和儿童的 EDI 值分别是 PTDI 值的 4.2~9.5 倍和 2.4~5.4 倍, 表明猫爪草长期摄入时, Cr 含量对于成人及儿童均存在明显健康危害风险。Al: 成人的 EDI 值是 PTDI 值的 0.8~

3.1 倍, 仅 2 个样品的 EDI 值小于 PTDI 值; 所有样品儿童的 EDI 值虽小于 PTDI 值, 但远大于 10% PTDI 值, 表明 Al 对成人存在明显健康危害风险, 对儿童也存在一定健康危害风险。Ni: 所有样品成人及儿童的 EDI 值均大于 10% PTDI 值, 表明 Ni 对成人及儿童均存在一定健康危害风险。Pb: 成人和儿童的 EDI 值 > 10% PTDI 值的样品分别占 88% 和 20%, 表明 Pb 对成人存在一定健康危害风险, 对儿童的健康风险概率较小。As: 成人和儿童的 EDI 值 > 10% PTDI 值的样品分别占 48% 和 0%, 表明 As 对儿童无明显健康危害风险, 但有部分产地的 As 对成人存在一定的健康危害风险。Cu: 成人和儿童的 EDI 值 > 10% PTDI 值的样品分别占 24% 和 0%, 表明 Cu 对儿童则无明显健康危害风险, 但有少部分产地的 Cu 对成人存在一定的健康危害风险。Zn、Cd、Hg、Se: 仅 1 个样品中 Zn 的成人 EDI 值略高于 10% PTDI 值, 其余样品成人及儿童的 EDI 值均小于 10% PTDI 值, 表明 Zn、Cd、Hg、Se 对成人及儿童基本不会有明显健康危害风险。

表 4 猫爪草重金属及有害元素 EDI 评估结果

Table 4 Assessment results of EDI of heavy metals and harmful elements in *Ranunculi ternati* radix $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$

样品	Pb		Cd		As		Hg		Cu	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	0.813	0.463	0.042	0.024	0.181	0.103	0.021	0.012	21.600	12.309
S2	0.344	0.196	0.054	0.031	0.154	0.088	0.018	0.010	24.098	13.732
S3	0.548	0.312	0.057	0.032	0.231	0.132	0.052	0.029	42.844	24.414
S4	0.367	0.209	0.035	0.020	0.139	0.079	0.012	0.007	17.689	10.008
S5	0.639	0.364	0.028	0.016	0.262	0.149	0.015	0.009	47.135	26.859
S6	0.390	0.222	0.045	0.025	0.190	0.108	0.008	0.004	56.109	31.972
S7	0.623	0.355	0.033	0.019	0.331	0.189	0.019	0.011	38.675	22.038
S8	0.536	0.305	0.037	0.021	0.277	0.158	0.009	0.005	63.245	36.039
S9	0.337	0.192	0.043	0.024	0.145	0.083	0.009	0.005	89.761	51.148
S10	0.420	0.239	0.035	0.020	0.201	0.115	0.015	0.008	52.227	29.760
S11	0.481	0.274	0.036	0.021	0.214	0.122	0.010	0.006	40.676	23.178
S12	0.667	0.380	0.042	0.024	0.170	0.097	0.016	0.009	20.360	11.602
S13	0.782	0.446	0.048	0.027	0.208	0.118	0.019	0.011	22.518	12.831
S14	0.475	0.271	0.031	0.018	0.283	0.162	0.014	0.008	52.162	29.724
S15	0.427	0.244	0.025	0.014	0.241	0.138	0.013	0.008	41.222	23.489
S16	0.532	0.303	0.035	0.020	0.241	0.137	0.016	0.009	49.357	28.125
S17	0.461	0.263	0.032	0.018	0.262	0.149	0.016	0.009	49.463	28.185
S18	0.528	0.301	0.032	0.018	0.234	0.133	0.013	0.008	47.249	26.924
S19	0.338	0.193	0.038	0.021	0.175	0.100	0.012	0.007	22.168	12.632
S20	0.426	0.243	0.037	0.021	0.184	0.105	0.013	0.007	20.461	11.659
S21	0.400	0.228	0.036	0.021	0.179	0.102	0.009	0.005	35.740	20.366
S22	0.493	0.281	0.035	0.020	0.186	0.106	0.009	0.005	31.417	17.902
S23	0.516	0.294	0.050	0.029	0.246	0.140	0.035	0.020	37.821	21.551
S24	0.461	0.263	0.032	0.018	0.235	0.134	0.008	0.004	58.323	33.234
S25	0.627	0.357	0.039	0.022	0.187	0.107	0.017	0.010	27.087	15.435
10% PTDI	0.357	0.357	0.066	0.066	0.214	0.214	0.057	0.057	50.000	50.000

续表 4

样品	Ni		Cr		Zn		Al		Se	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	4.468	2.546	17.952	10.168	24.617	13.942	389.791	222.113	0.119	0.068
S2	4.602	2.622	15.489	8.773	23.970	13.576	352.842	201.059	0.112	0.064
S3	7.162	4.081	22.069	12.499	21.609	12.238	605.620	345.098	0.230	0.131
S4	3.882	2.212	13.580	7.691	20.852	11.810	267.831	152.617	0.144	0.082
S5	7.081	4.035	13.688	7.752	22.758	12.889	580.826	330.970	0.326	0.186
S6	7.303	4.161	18.577	10.521	22.881	12.959	420.759	239.760	0.187	0.106
S7	6.837	3.896	28.527	16.157	21.559	12.210	876.487	499.446	0.198	0.113
S8	8.631	4.918	18.331	10.382	22.212	12.580	693.781	395.335	0.123	0.070
S9	8.096	4.613	12.912	7.313	22.090	12.511	237.627	135.406	0.056	0.032
S10	8.679	4.946	20.159	11.418	30.543	17.298	455.051	259.300	0.176	0.100
S11	7.674	4.373	15.335	8.685	22.396	12.684	504.257	287.339	0.101	0.057
S12	4.051	2.308	16.268	9.213	23.110	13.089	364.455	207.676	0.159	0.090
S13	4.479	2.552	18.131	10.269	25.260	14.306	408.111	232.553	0.144	0.082
S14	6.611	3.767	13.995	7.926	22.327	12.645	554.108	315.745	0.281	0.160
S15	6.252	3.563	12.525	7.094	23.341	13.220	536.102	305.485	0.291	0.166
S16	7.118	4.056	14.064	7.965	22.424	12.700	591.861	337.258	0.303	0.173
S17	7.144	4.071	14.222	8.055	23.062	13.061	559.335	318.724	0.275	0.156
S18	7.323	4.173	15.010	8.501	24.198	13.705	605.220	344.871	0.257	0.146
S19	3.844	2.190	13.043	7.387	21.692	12.285	264.885	150.938	0.165	0.094
S20	4.076	2.323	15.785	8.940	20.405	11.557	270.777	154.296	0.132	0.075
S21	6.800	3.875	13.798	7.815	21.418	12.130	463.412	264.065	0.121	0.069
S22	6.488	3.697	15.319	8.676	22.417	12.696	516.359	294.235	0.123	0.070
S23	7.025	4.003	22.749	12.884	21.940	12.426	616.521	351.310	0.258	0.147
S24	7.393	4.213	16.029	9.078	21.826	12.361	625.097	356.197	0.112	0.064
S25	4.347	2.477	18.305	10.367	24.413	13.827	424.872	242.104	0.160	0.091
10% PTDI	1.200	1.200	0.300	0.300	30.000	30.000	28.570	57.140	0.500	0.500

上述结果提示,长期摄入猫爪草时应注意 Cr、Al、Ni、Pb、As、Cu 的健康危害风险。

2.3.2 THQ、TTHQ 评估 当 THQ(TTHQ)<1 时,表明该重金属或有害元素含量不会对人体造成严重的非致癌健康风险;当 THQ(TTHQ)>1 时,表明有潜在非致癌风险,应加以关注^[16]。ISO 组织提出药物摄入的重金属占食物的一部分,计算应考虑其占食物的比例,因此还应根据猫爪草摄入量(成人按 30 g 计,儿童按 10 g 计)占每日食物总量的比例计算标准 THQ^[14],成人每日食物总量按 1 500 g 计,儿童按 800 g 计^[26],成人的标准 THQ 为 0.02,儿童的标准 THQ 为 0.012 5,即对于猫爪草,成人 THQ≤0.02,儿童 THQ≤0.012 5 时,对健康无明显影响。

由表 5 可知,对于 Cr、Al、Cu、As 4 种元素,所有样品

的成人及儿童平均 THQ 均高于其对应的标准 THQ。其中,Cr、Al、Cu、As 的成人 THQ 在 0.020 0~1.000 0 的比例依次为 100%,100%,76%,84%;儿童 THQ 在 0.012 5~1.000 0 的比例依次为 100%,80%,72%,64%。表明成人长期摄入猫爪草,Cr、Al 以及大部分产地 Cu 和 As 可能带来一定的非致癌健康风险,儿童长期摄入猫爪草,Cr 及大部分产地的 Al、Cu、As 有潜在非致癌健康风险。但因上述 THQ 均未超过 1,风险并不严重。Pb、Cd、Hg、Ni、Zn、Se、Mn 7 种元素中,成人 THQ≤0.020 0,儿童 THQ≤0.012 5,表明这 7 种元素非致癌健康风险可忽略。

25 个不同产地猫爪草样品中,成人 TTHQ 均在 0.020 0~1.000 0,儿童 TTHQ 均在 0.012 5~1.000 0,说明长期摄入猫爪草时,重金属及有害元素叠加可能带来一定

表 5 猫爪草重金属及有害元素 THQ,TTHQ 计算结果

Table 5 Calculation results of THQ and TTHQ of heavy metals and harmful elements in *Ranunculi ternati radix* × 10⁻³

样品	Pb		Cd		As		Hg		Cu		Ni	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	7.2	4.1	1.5	0.8	21.3	12.1	2.5	1.4	19.0	10.8	7.9	4.5
S2	3.0	1.7	1.9	1.1	18.1	10.3	2.1	1.2	21.2	12.1	8.1	4.6
S3	4.8	2.8	2.0	1.1	27.1	15.5	6.1	3.5	37.7	21.5	12.6	7.2
S4	3.2	1.8	1.2	0.7	16.3	9.3	1.4	0.8	15.6	8.9	6.8	3.9
S5	5.6	3.2	1.0	0.6	30.8	17.5	1.8	1.0	41.5	23.7	12.5	7.1
S6	3.4	2.0	1.6	0.9	22.3	12.7	0.9	0.5	49.4	28.2	12.9	7.3
S7	5.5	3.1	1.1	0.7	38.9	22.2	2.2	1.2	34.1	19.4	12.0	6.9
S8	4.7	2.7	1.3	0.7	32.6	18.6	1.0	0.6	55.7	31.7	15.2	8.7
S9	3.0	1.7	1.5	0.9	17.1	9.7	1.1	0.6	79.0	45.0	14.3	8.1
S10	3.7	2.1	1.2	0.7	23.6	13.5	1.7	1.0	46.0	26.2	15.3	8.7
S11	4.2	2.4	1.3	0.7	25.2	14.3	1.2	0.7	35.8	20.4	13.5	7.7
S12	5.9	3.3	1.5	0.8	20.0	11.4	1.9	1.1	17.9	10.2	7.1	4.1
S13	6.9	3.9	1.7	1.0	24.4	13.9	2.2	1.3	19.8	11.3	7.9	4.5
S14	4.2	2.4	1.1	0.6	33.3	19.0	1.6	0.9	45.9	26.2	11.6	6.6
S15	3.8	2.1	0.9	0.5	28.3	16.2	1.6	0.9	36.3	20.7	11.0	6.3
S16	4.7	2.7	1.2	0.7	28.3	16.1	1.9	1.1	43.5	24.8	12.5	7.1
S17	4.1	2.3	1.1	0.6	30.7	17.5	1.9	1.1	43.6	24.8	12.6	7.2
S18	4.7	2.7	1.1	0.7	27.4	15.6	1.6	0.9	41.6	23.7	12.9	7.3
S19	3.0	1.7	1.3	0.8	20.6	11.7	1.4	0.8	19.5	11.1	6.8	3.9
S20	3.8	2.1	1.3	0.7	21.6	12.3	1.5	0.8	18.0	10.3	7.2	4.1
S21	3.5	2.0	1.3	0.7	21.0	12.0	1.1	0.6	31.5	17.9	12.0	6.8
S22	4.3	2.5	1.2	0.7	21.8	12.4	1.0	0.6	27.7	15.8	11.4	6.5
S23	4.5	2.6	1.8	1.0	28.9	16.5	4.2	2.4	33.3	19.0	12.4	7.1
S24	4.1	2.3	1.1	0.6	27.6	15.8	0.9	0.5	51.4	29.3	13.0	7.4
S25	5.1	3.1	1.4	0.8	22.0	12.5	2.1	1.2	23.9	13.6	7.7	4.4

样品	Cr		Zn		Al		Se		Mn		TTHQ	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	210.8	120.1	2.9	1.6	48.1	13.6	0.8	0.5	5.8	3.3	327.7	172.9
S2	181.9	103.6	2.8	1.6	43.5	12.3	0.8	0.4	9.7	5.5	293.1	154.5
S3	259.1	147.7	2.5	1.4	74.7	21.1	1.6	0.9	13.0	7.4	441.3	230.0
S4	159.5	90.9	2.4	1.4	33.0	9.4	1.0	0.6	6.6	3.8	247.2	131.4
S5	160.7	91.6	2.7	1.5	71.6	20.3	2.3	1.3	6.9	3.9	337.4	171.7
S6	218.1	124.3	2.7	0.5	51.9	14.7	1.3	0.7	8.0	4.6	372.5	197.4
S7	335.0	190.9	2.5	1.4	108.1	30.6	1.4	0.8	9.4	5.3	550.2	282.5
S8	215.2	122.6	2.6	1.5	85.5	24.2	0.9	0.5	8.2	4.6	423.0	216.5
S9	151.6	86.4	2.6	1.5	29.3	8.3	0.4	0.2	7.1	4.0	306.9	166.5
S10	236.7	134.9	3.6	2.0	56.1	15.9	1.2	0.7	6.5	3.7	395.7	209.4
S11	180.1	102.6	2.6	1.5	62.2	17.6	0.7	0.4	7.4	4.2	334.2	172.6
S12	191.0	108.8	2.7	1.5	44.9	12.7	1.1	0.6	6.3	3.6	300.4	158.3
S13	212.9	121.3	3.0	1.7	50.3	14.2	1.0	0.6	6.6	3.7	336.7	177.4

续表 5

样品	Cr		Zn		Al		Se		Mn		TTHQ	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S14	164.3	93.6	2.6	1.5	68.3	19.3	2.0	1.1	7.4	4.2	342.4	175.5
S15	147.1	83.8	2.7	1.6	66.1	18.7	2.0	1.2	6.5	3.7	306.3	155.5
S16	165.1	94.1	2.6	1.5	73.0	20.7	2.1	1.2	6.8	3.9	341.8	173.8
S17	167.0	95.2	2.7	1.5	69.0	19.5	1.9	1.1	7.1	4.0	341.6	174.9
S18	176.2	100.4	2.8	1.6	74.6	21.1	1.8	1.0	7.5	4.3	352.3	179.3
S19	153.2	87.3	2.5	1.5	32.7	9.2	1.2	0.7	6.1	3.4	248.2	132.0
S20	185.3	105.6	2.4	1.4	33.4	9.5	0.9	0.5	6.1	3.5	281.5	150.8
S21	162.0	92.3	2.5	1.4	57.1	16.2	0.9	0.5	6.6	3.7	299.4	154.2
S22	179.9	102.5	2.6	1.5	63.7	18.0	0.9	0.5	6.6	3.7	321.1	164.7
S23	267.1	152.2	2.6	1.5	76.0	21.5	1.8	1.0	11.8	6.7	444.4	231.4
S24	188.2	107.2	2.6	1.5	77.1	21.8	0.8	0.4	7.3	4.2	374.1	191.0
S25	214.9	122.5	2.9	1.6	52.4	14.8	1.1	0.6	7.3	4.1	341.1	179.3

的非致癌性健康风险,TTHQ的平均贡献率为Cr>Al>Cu>As,以成人计,依次为56.5%,17.1%,10.3%,7.3%。提示,长期摄入猫爪草时应注意Cr、Al、Cu、As带来的健康风险,与EDI分析结果前两位元素(Cr、Al)排序一致,其中Cr均占首位。值得注意的是,植物中的Cr均为三价Cr,其毒性相对较低,参与机体糖代谢、脂代谢以及蛋白质代谢,是机体必需元素,而六价Cr是主要环境污染物之一,有肝、肾毒性及明确的致癌性^[27],但也有研究表明三价Cr可通过血睾屏障进入生殖系统,干扰精子的正常发育,体现出生殖毒性^[28]。因此,尽管《中国药典》未针对中药材进行Cr限量,但长期摄入猫爪草,Cr的风险仍需要

注意。
2.3.3 致癌风险评估 根据USEPA的指导,CR(TCR)值>10⁻⁴,表示物质存在确定致癌风险,CR(TCR)≤10⁻⁶,表示致癌风险可忽略不计,在10⁻⁶~10⁻⁴时,表示存在可接受的致癌风险^[27]。

由表6可知,25个不同产地猫爪草样品中,Pb的成人及儿童CR值均小于1×10⁻⁶,致癌风险可以忽略不计,Cd、As的成人及儿童CR值均在10⁻⁶~10⁻⁴,致癌风险均在可接受范围内。3种重金属总致癌风险TCR值均在10⁻⁶~10⁻⁴,表明Pb、Cd、As的总量对成人和儿童均不会造成不可接受的致癌风险,但由于所有受试样品中Cd、As的成

表 6 猫爪草重金属及有害元素CR与TCR计算结果

Table 6 Calculation results of CR and TCR of heavy metals and harmful elements in *Ranunculi ternati* radix

样品	Pb		Cd		As		TCR	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
S1	0.24	0.14	8.98	5.15	9.59	5.50	18.81	10.78
S2	0.10	0.06	11.66	6.68	8.13	4.66	19.89	11.40
S3	0.16	0.09	12.15	6.97	12.21	7.00	24.52	14.06
S4	0.11	0.06	7.61	4.36	7.34	4.21	15.05	8.63
S5	0.19	0.11	5.96	3.42	13.84	7.93	20.00	11.46
S6	0.12	0.07	9.56	5.48	10.03	5.75	19.70	11.30
S7	0.19	0.11	6.99	4.01	17.51	10.04	24.69	14.15
S8	0.16	0.09	7.94	4.55	14.66	8.40	22.75	13.05
S9	0.10	0.06	9.15	5.25	7.68	4.41	16.94	9.71
S10	0.13	0.07	7.42	4.25	10.63	6.09	18.17	10.42
S11	0.14	0.08	7.79	4.47	11.33	6.49	19.26	11.04
S12	0.20	0.11	9.09	5.21	8.99	5.15	18.28	10.48
S13	0.23	0.13	10.24	5.87	10.97	6.29	21.45	12.30
S14	0.14	0.08	6.76	3.88	14.98	8.59	21.88	12.55
S15	0.13	0.07	5.36	3.07	12.76	7.31	18.25	10.46
S16	0.16	0.09	7.42	4.26	12.72	7.30	20.31	11.64
S17	0.14	0.08	6.87	3.94	13.82	7.92	20.83	11.94
S18	0.16	0.09	6.97	4.00	12.35	7.08	19.48	11.17
S19	0.10	0.06	8.07	4.63	9.25	5.31	17.43	9.99
S20	0.13	0.07	7.89	4.52	9.71	5.57	17.72	10.16
S21	0.12	0.07	7.75	4.44	9.46	5.43	17.33	9.94
S22	0.15	0.08	7.57	4.34	9.81	5.63	17.53	10.05
S23	0.15	0.09	10.81	6.20	13.02	7.46	23.98	13.75
S24	0.14	0.08	6.87	3.94	12.44	7.13	19.45	11.15
S25	0.19	0.11	8.41	4.82	9.89	5.67	18.49	10.60
平均	0.15	0.09	8.21	4.71	11.32	6.49	19.69	11.29

人及儿童 CR 值均超过 1×10^{-6} , 因此, 长期摄入猫爪草, Cd、As 引起的致癌风险需要关注。

2.4 PCA 分析

不同产地猫爪草中 24 种元素的特征值及方差贡献率综合分析结果见表 7。结果显示, 方差累计贡献率达 88.121%, 特征值均大于 1, 提取到 7 个主成分, 碎石图见图 1。前 7 个成分较陡, 其他成分趋于平缓, 说明前 7 个主成分能够代替原始变量大部分信息来评价不同产地样品的差异。由表 8 可知, 第 1 主成分的代表元素 V、Al、Cs、Co、As、Fe、Mn、Tl、Cr; 第 2 主成分的代表元素 Pb、K、Ni、Sr、Cu、Ag; 第 3 主成分代表元素 Cd、Hg; 第 4 主成分的代表元素 Sr、Zn、Ca、Na; 第 5 主成分的代表元素 Mo、Mg; 第 6 主成分的代表元素 Se, 因此 V、Al、Cs、Co、As、Fe、Mn、Tl、Cr、Pb、K、Ni、Sr、Cu、Ag、Cd、Hg、Zn、Ca、Na、Mo、Mg、Se 是特征元素。主成分得分图见图 2。24 种元素含量可以区分不同产地的猫爪草, 其中, 河南息县、河南信阳、河南淮滨、河南潢川、河南正阳、河南遂平、四川成都、四川宜宾、广东韶关聚为一类, 广东清远、湖南益阳、云南昆明、云南文山、贵州仁怀、安徽阜阳、安徽六安、甘肃渭源、广西桂林、广西钦州、广西玉林、山东菏泽聚为一类, 江西德安为一类, 江苏茅山、江苏南通为一类。

表 7 猫爪草样品主成分特征值及方差贡献率

Table 7 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components in *Ranunculi ternati* radix samples

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	7.331	30.545	30.545
2	4.031	16.796	47.340
3	3.401	14.172	61.513
4	2.489	10.370	71.882
5	1.581	6.589	78.471
6	1.304	5.432	83.902
7	1.012	4.218	88.121

安徽六安、甘肃渭源、广西桂林、广西钦州、广西玉林、山东菏泽聚为一类, 江西德安为一类, 江苏茅山、江苏南通为一类。

2.5 PLS-DA 分析

采用 SIMCA14.1 软件对 25 批猫爪草微量元素含量进行 PLS-DA 建模分析, 构建产地判别模型, 基于 24 种元素构建 25 批不同产地猫爪草的 PLS-DA 模型, 以变量投

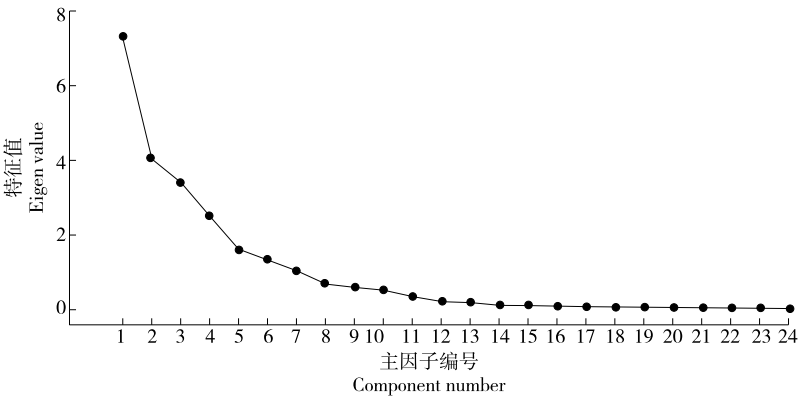


图 1 猫爪草样品主因子分析碎石图

Figure 1 Scree plot of principal factor analysis for *Ranunculi ternati* radix samples

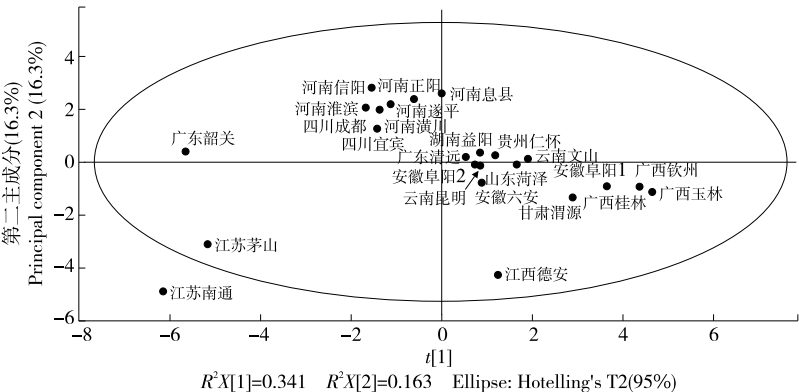


图 2 猫爪草样品 PCA 得分图

Figure 2 PCA score plot for *Ranunculi ternati* radix samples

表 8 猫爪草样品主因子分析载荷系数矩阵

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6	主成分 7
V	0.922	0.013	−0.242	−0.118	−0.097	−0.177	−0.063
Al	0.913	−0.066	−0.301	0.019	−0.159	−0.148	−0.037
Cs	0.875	−0.028	−0.345	−0.018	−0.186	−0.161	0.017
Co	0.841	−0.193	0.371	−0.237	0.032	0.095	−0.075
As	0.839	0.205	−0.373	−0.046	−0.089	−0.065	−0.157
Fe	0.787	−0.101	−0.381	−0.235	−0.168	−0.075	0.053
Mn	0.592	−0.461	0.560	0.121	−0.031	0.143	−0.131
Tl	0.537	0.136	0.354	−0.304	0.107	0.051	0.045
Cr	0.526	−0.328	0.373	0.243	−0.334	−0.408	0.095
Ba	0.520	−0.305	0.427	0.456	0.086	0.057	−0.158
Pb	0.380	0.739	0.095	0.073	−0.067	−0.260	0.404
K	0.339	0.691	0.179	0.493	−0.006	0.026	0.214
Ni	0.465	−0.668	−0.405	0.093	0.231	0.127	0.227
Sr	0.125	−0.656	0.172	0.512	0.217	−0.042	−0.177
Cu	0.265	−0.547	−0.388	0.129	0.540	0.164	0.061
Ag	0.515	0.537	0.072	−0.355	0.258	0.366	0.102
Cd	0.132	0.148	0.807	−0.271	0.330	−0.048	0.160
Hg	0.533	0.083	0.705	0.097	−0.128	0.346	0.102
Zn	−0.154	−0.281	−0.046	0.656	−0.019	−0.117	0.481
Ca	0.135	0.439	−0.386	0.620	0.113	0.317	0.151
Na	−0.257	0.474	0.154	0.534	−0.323	−0.015	−0.449
Mo	0.137	0.493	−0.316	0.057	0.563	−0.254	−0.220
Mg	0.387	0.398	0.232	0.278	0.545	−0.381	−0.213
Se	0.512	0.300	−0.289	0.247	−0.155	0.566	−0.169

影重要性(VIP)≥1.0为标准(图 3),筛选得到 4 个特征元素,贡献从大到小依次为 K、Mg、Fe、Al。

3 结论

采用电感耦合等离子体质谱法对 25 个不同产地猫爪

草样品中的 24 种元素进行含量测定与分析。结果显示, 25 个不同产地猫爪草样品中均含有丰富的 人体必需矿物质元素,K、Mg、Fe、Al 是含量最高的 4 种元素。不同产地猫爪草的矿物元素存在差异性,这可能与不同产地的土壤元素含量的差异有关,而 Cu 元素的含量则可能与猫爪

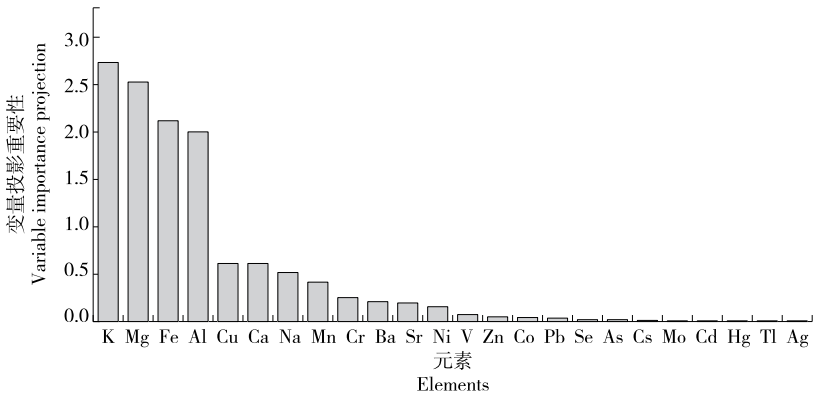


图 3 猫爪草样品变量投影重要性图

Figure 3 Variable importance projection plot for *Ranunculi ternati* radix samples

草对 Cu 的富集作用有关。通过主因子分析确定了 V、Al、Cs、Co、As、Fe、Mn、Ti、Cr、Pb、K、Ni、Sr、Cu、Ag、Cd、Hg、Zn、Ca、Na、Mo、Mg、Se 等元素为猫爪草的特征元素, 可明显区分不同产地样品。采用偏最小二乘判别分析建立了不同产地猫爪草的判别模型, 对 24 种元素进行变量投影重要性分析, 确定了 K、Mg、Fe、Al 4 种元素可作为猫爪草产地的有效溯源指标。

采用每日最大耐受摄入量、靶标危害系数、潜在致癌风险指数对重金属和有害元素进行健康风险评估。猫爪草中所含 Cr、Al、Cu、As、Ni、Pb 等元素在前两种评估方法中存在一定的健康风险, 尤其是 Cr、Al、Cu、As 4 种元素。潜在致癌风险指数分析中, Cd、As 2 种重金属的致癌风险值计算结果均超过 1×10^{-4} , 应注意长期服用猫爪草 Cd、As 带来的致癌风险以及多种重金属带来的总致癌风险。以上结果提示, 长期摄入猫爪草时, 应注意剂量和服用时间的控制, 降低 Cr、Al、As、Cu、Ni、Pb、Cd 等元素带来的健康风险。

为了完善对猫爪草的质量控制, 更安全的应用猫爪草资源, 应积极推动猫爪草的生态种植, 加大对土壤重金属的检测, 评价土壤—药材重金属含量的相关性, 研究重金属的不同赋存形态对重金属的转移影响效应^[26], 从而更全面地评价重金属及有害元素的污染状况和健康风险。同时还应注意减少含 Cu 农药的施用, 控制 Cu 污染。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 2020 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 333.
State Pharmacopoeia Committee. Chinese pharmacopoeia: part I [S]. 2020 ed. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020: 333.
- [2] 河南信阳专署中医诊所. 猫爪草治疗淋巴结核[J]. 中国防痨, 1958(5): 24-25.
Tem Clinic of Xinyang Commissioner's Office, Henan Province. *Ranunculi ternati* radix in the treatment of tuberculous lymphadenitis[J]. Chinese Journal of Antituberculosis, 1958(5): 24-25.
- [3] 刘娜, 李兰涛. 基于 CiteSpace 的知识图谱分析猫爪草研究现状及发展趋势[J]. 今日药学, 2025, 35(3): 196-204.
Liu N, Li L T. Current status and development trends of *Ranunculi ternati* radix research: a knowledge map analysis based on CiteSpace[J]. Pharmacy Today, 2025, 35(3): 196-204.
- [4] 孙岩, 卢智玲, 邹耀华, 等. 基于 ICP-MS 结合多元统计的林下山参中矿物质元素分析[J]. 中药材, 2024, 47(7): 1 738-1 744.
Sun Y, Lu Z L, Zou Y H, et al. Mineral element analysis of wild *Ginseng* using ICP-MS combined with multivariate statistics[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2024, 47(7): 1 738-1 744.
- [5] 何秋云, 何敏, 陈明, 等. 基于 ICP-MS 结合化学计量学分析五指毛桃中微量元素含量及健康风险评估[J]. 中药材, 2024, 47(10): 2 549-2 554.
He Q Y, He M, Chen M, et al. Trace element content and health risk assessment of *Morinda officinalis* based on ICP-MS combined with chemometric analysis[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2024, 47(10): 2 549-2 554.
- [6] 刘浩, 郭海涛, 姬爱熙, 等. ICP-MS 法测定松花粉无机元素含量及安全性、健康风险评估[J]. 河北科技大学学报, 2025, 46(1): 67-76.
Liu H, Guo H T, Ji A X, et al. Determination of inorganic elements in pine pollen by ICP-MS and safety and health risk assessment[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(1): 67-76.
- [7] 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): 1 870-1 876.
Zuo T T, Zhang L, Shi S H, et al. Risk assessment and theoretical limits for heavy metals and harmful elements in 10 types of root and rhizome Chinese medicinal materials[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2020, 40(10): 1 870-1 876.
- [8] 冯俊, 李清清. 微波消解—电感耦合等离子体质谱法测定根茎类中药材中多种重金属元素含量[J]. 食品与药品, 2022, 24(5): 432-437.
Feng J, Li Q Q. Determination of heavy metal elements in rhizomatic traditional Chinese medicine by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Food and Drug, 2022, 24(5): 432-437.
- [9] 金山丛, 汪学昭, 郑汉臣, 等. 中药猫爪草的微量元素分析[J]. 微量元素与健康研究, 1997(2): 29-30.
Quan S C, Wang X Z, Zheng H C, et al. Trace element analysis of *Ranunculi ternati* radix[J]. Studies of Trace Elements and Health, 1997(2): 29-30.
- [10] 陈军, 姚成, 欧阳平凯. ICP-AES 法测定猫爪草中常量及微量元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2005(4): 560-562.
Chen J, Yao C, Ouyang P K. Determination of constant and trace elements in *Ranunculus ternatus* thunb by ICP-AES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005(4): 560-562.
- [11] 任盼莹, 程梦娟, 王丰青, 等. ICP-MS 结合化学模式识别分析野生地黄产区土壤中矿物元素分布特征[J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(5): 859-868, 827.
Ren P Y, Cheng M J, Wang F Q, et al. Analysis of distribution characteristics of mineral elements in the soil of wild *Rehmannia glutinosa* production area by ICP-MS combined with chemical pattern recognition[J]. Natural Product Research and Development, 2025, 37(5): 859-868, 827.
- [12] 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 L Z, 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.
- [13] 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 S W, Li D M, Liu X Y, 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.
- [14] 李运, 戚鹏飞, 张晓萍, 等. 基于 ICP-MS 技术的六神曲中无机元素分析及其风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(9): 1 340-1 352.
- Li Y, Qi P F, Zhang X P, et al. Analysis and risk assessment of inorganic elements in *Liushenqu* based on ICP-MS technology [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(9): 1 340-1 352.
- [15] 陈雄, 梁军, 李青, 等. ICP-MS 法测定安化黑茶中 4 种重金属元素含量及健康风险评估[J]. 食品安全导刊, 2024(24): 68-70.
- Chen X, Liang J, Li Q, et al. Determination of four heavy metals in Anhua black tea by ICP-MS and health risk assessment[J]. China Food Safety Magazine, 2024(24): 68-70.
- [16] 闫研, 秦斌, 梁雪, 等. 17 种中药材中重金属污染分析与健康风险评估[J]. 药学研究, 2023, 42(11): 902-908.
- Yan Y, Qin B, Liang X, et al. Pollution analysis and health risk assessment of heavy metals in seventeen kinds of Chinese medicinal materials[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2023, 42(11): 902-908.
- [17] 王巧, 于永杰, 王紫怡, 等. 基于 ICP-MS 的不同产地丹参元素差异分析及健康风险评估[J]. 中药材, 2023, 46(9): 2 224-2 232.
- Wang Q, Yu Y J, Wang Z Y, et al. Element difference analysis and health risk assessment of *Salviae miltiorrhizae* radix et rhizoma from different producing areas based on ICP-MS[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2023, 46(9): 2 224-2 232.
- [18] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 四部[S]. 2020 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 520.
- State Pharmacopoeia Committee. Chinese pharmacopoeia: part IV[S]. 2020 ed. Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020: 520.
- [19] Limón G, Samhadaneh N M, Pironti A, et al. Aldehyde accumulation in *Mycobacterium tuberculosis* with defective proteasomal degradation results in copper sensitivity[J]. mBio, 2023, 14(4): e0036323.
- [20] 徐志弘. Rv1273c-Rv1272c 与铜转运及 rpoC 突变对利福平耐药结核分枝杆菌转录谱的调控研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 5-6.
- Xu Z H. Rv1273c-Rv1272c for copper transport and rpoC mutations in rifampicin-resistant *Mycobacterium tuberculosis* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 5-6.
- [21] Wolschendorf F, Ackart D, Shrestha T B, et al. Copper resistance is essential for virulence of *Mycobacterium tuberculosis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(4): 1 621-1 626.
- [22] Zimnicka A M, Tang H Y, Guo Q, et al. Upregulated copper transporters in hypoxia-induced pulmonary hypertension[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e90544.
- [23] White C, Kambe T, Fulcher Y G, et al. Copper transport into the secretory pathway is regulated by oxygen in macrophages [J]. Journal of Cell Science, 2009, 122(9): 6.
- [24] 刘骏达, 钟薇薇, 鲁显福, 等. 铜死亡与铜代谢相关疾病研究进展[J]. 江苏大学学报(医学版), 2022, 32(4): 318-325.
- Liu J D, Zhong W W, Lu X F, et al. Research advances on copper death and copper metabolism-related diseases[J]. Journal of Jiangsu University (Medicine Edition), 2022, 32(4): 318-325.
- [25] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk based concentration table-0249[R]. Washington DC: USEPA, 2000: 2-3.
- [26] 李晓玲, 童巧珍, 石雨荷, 等. 龙牙百合不同器官重金属含量分布特征及健康风险评估[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 56-64.
- Li X L, Tong Q Z, Shi Y H. Characteristics of heavy metal content distribution in different organs of *Lilium brownii* and its health risk assessment[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 56-64.
- [27] 考庆君, 吴坤. 铬的生物学作用及毒性研究进展[J]. 中国公共卫生, 2004(11): 122-124.
- Kao Q J, Wu K. Research progress on the biological effects and toxicity of chromium[J]. Chinese Journal of Public Health, 2004(11): 122-124.
- [28] 余晓星, 彭宝成. 三氯化铬的蓄积毒性及其对骨髓细胞微核率和精子形成的影响[J]. 河北医科大学学报, 1997(3): 14-16.
- Yu X X, Peng N C. Accumulative toxicity and effects on marrow cell micronucleus rate and sperm formation of CrCl₃[J]. Journal of Hebei Medical University, 1997(3): 14-16.