

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241029003

引用格式: 赖志坚, 陈秋玲, 刘国伟, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地莲子心中 19 种金属元素及其主成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 185–193.

LAI ZJ, CHEN QL, LIU GW, *et al.* Determination and principal component analysis on 19 kinds of metal elements in *Nelumbo nucifera* Gaertn. from different origins by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 185–193. (in Chinese with English abstract).

# 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地莲子心中 19 种金属元素及其主成分分析

赖志坚<sup>#</sup>, 陈秋玲<sup>\*\*</sup>, 刘国伟, 张津津, 黄 勇, 石 诚, 杨晓彬, 姚艺新

(康美药业股份有限公司, 深圳 518000)

**摘 要:** **目的** 建立莲子心 19 种金属元素电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)的分析方法, 并对不同产地莲子心金属元素含量进行比较分析。**方法** 莲子心样品经微波消解, 采用 ICP-MS 测定金属元素含量, 并绘制金属元素指纹图谱, 采用 SPSS 26.0 对金属元素含量进行主成分分析。**结果** 莲子心 19 种金属元素指纹图谱具有一定的特征性; 有害金属元素含量应引起关注。主成分分析筛选出 8 个主因子, 得出 B、S、Ca、Mn、Fe、Zn、Sr、Sb、Ba、As、Pb 是莲子心的特征金属元素; 与主成分分析结果呈正相关的元素相关性从大到小依次为 Pb、As、Ba、Zn、Sb、Mg、Cd、K、S、B、Na、Hg、Cu、Fe、Ni; 呈负相关的元素相关性从大到小依次为 Sr、Mn、Ca、Mo。**结论** 该方法快速、准确、灵敏度高, 适用于测定莲子心多种金属元素含量的同时测定, 为莲子心的质量控制及安全性评价提供依据。

**关键词:** 莲子心; 金属元素; 主成分分析; 电感耦合等离子体质谱法

## Determination and principal component analysis on 19 kinds of metal elements in *Nelumbo nucifera* Gaertn. from different origins by inductively coupled plasma-mass spectrometry

LAI Zhi-Jian<sup>#</sup>, CHEN Qiu-Ling<sup>\*\*</sup>, LIU Guo-Wei, ZHANG Jin-Jin, HUANG Yong, SHI Cheng, YANG Xiao-Bin, YAO Yi-Xin

(Kangmei Pharmaceutical Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the analysis of 19 kinds of metal elements in *Nelumbo nucifera* Gaertn. by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), and to compare and analyze the metal elements content from different areas. **Methods** The *Nelumbo nucifera* Gaertn. sample was digested by microwave, and the metal elements content was determined by ICP-MS. The metal element fingerprint was drawn, and principal

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 国家中药标准化项目(ZYBZH-Y-GD-13); 中药配方颗粒产品研发项目(KMY20220801)

<sup>#</sup>赖志坚和陈秋玲为共同第一作者

第一作者: 赖志坚(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为中药质量标准研究。E-mail: 1760010570@qq.com

第一作者/<sup>\*</sup>通信作者: 陈秋玲(1989—), 女, 硕士, 执业药师, 主要研究方向为食品药品质量标准研究。E-mail: 724891497@qq.com

component analysis was performed on the metal element content using SPSS 26.0 software. **Results** The fingerprint of 19 kinds of metal elements in the *Nelumbo nucifera* Gaertn. had certain characteristics, and the content of harmful metal elements should be of concerned. Principal component analysis identified 8 main factors and identified B, S, Ca, Mn, Fe, Zn, Sr, Sb, Ba, As, and Pb as characteristic metal elements for *Nelumbo nucifera* Gaertn.. The correlation of 19 kinds of metal elements with the comprehensive score value of principal component analysis that were positively correlated in decreasing order were as follows: Pb, As, Ba, Zn, Sb, Mg, Cd, K, S, B, Na, Hg, Cu, Fe, Ni, and negatively correlated correlated in decreasing order were as follows: Sr, Mn, Ca, Mo. **Conclusion** The method is rapid, accurate and sensitive, and can be used for the simultaneous determination of the content of various metal elements in *Nelumbo nucifera* Gaertn.. It provides the basis for the quality control and safety evaluation of *Nelumbo nucifera* Gaertn..

**KEY WORDS:** *Nelumbo nucifera* Gaertn.; metal elements; principal component analysis; inductively coupled plasma-mass spectrometry

## 0 引言

药食同源物质是指既是食品又是中药材的物质, 莲子是首批被列入我国卫生部公布的药食同源名单的品种之一。莲子属于睡莲科植物莲的种子, 既可以作为食物食用, 也可以作为中药使用。莲子心来源于莲科植物莲(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)的成熟种子中的干燥幼叶及胚根, 具有“清心安神、交通心肾、涩精止血”功效。

近年来研究表明金属元素通过调节植物的生长而影响有效成分的积累。金属元素是维持人体正常新陈代谢和生命活动的重要物质, 与人体健康密不可分, 可分为常量元素和必需微量元素, 适宜的金属元素含量能使人体的健康保持在最佳状态, 缺乏和过量都与人们的健康息息相关<sup>[1-5]</sup>。缺乏相关元素可能会引起人体器官功能失调或病理变化。对于人体健康的影响非常复杂, 元素进入人体后, 部分会与生物大分子结合, 以多种金属酶、金属激素、氨基酸和蛋白质的金属络合物等形式调节人体新陈代谢。部分高浓度微量元素可能对人体有害, 而必需微量元素的过度消耗, 则可能会导致由酶功能障碍引起的人体代谢平衡失调<sup>[6-11]</sup>。S 是人体内蛋白质的重要组成元素, K、Mg、Na 和 Ca 是人体必需的常量元素, Mg 影响细胞的多种生物功能, 影响 K<sup>+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>的转运, 调控信号的传递, 参与能量代谢、蛋白质和核酸的合成<sup>[12-17]</sup>; Fe 参与血红蛋白、肌红蛋白及多种含铁酶的合成, 参与物质代谢过程; Zn 元素是免疫器官胸腺发育的营养素; Cd 对儿童的成长具有明显的毒害作用; Mn 能激活人体内的多种酶, 有抗衰老、抗突变的作用, 抑制肿瘤的发生、发展<sup>[18-21]</sup>; Mo 是黄嘌呤氧化酶、醛氧化酶和亚硫酸氧化酶的组成成份; Ni 是核酸、镍胞浆素的组成成份; Sr 具有抗衰、防老、抗癌、促进骨修复作用, 与骨骼的形成密切相关, 为人体骨骼及牙齿的组成部分<sup>[22-26]</sup>。重金属及有害元素是安全性评价的重要指标, 有害金属元素 Pb、

Hg、Cu、Cd、As 危害人体健康, 对产品质量同样有重要的影响。重金属被摄入人体后会在体内累积, 当达到一定水平时, 可对人体器官组织造成危害。2020 年版中国药典四部 9302《中药有害残留物限量制定指导原则》制定了药材及饮片(植物类)重金属及 Pb、Hg、As、Cd、Cu 有害金属元素的限量标准<sup>[27-29]</sup>。因此, 加强对中药材及其饮片的重金属及有害元素的监测具有重要意义。

目前金属元素的测定方法主要有电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)法、电感耦合等离子体发射光谱(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, ICP-AES)法以及原子吸收光谱(atomic absorption spectrometry, AAS)法。其中 AAS 法存在耗时长、检出限较高、基体效应大、线性范围窄、且难以实现多元素同时分析的问题。ICP-AES 法虽可以同时测定多种元素, 但存在谱线干扰多, 灵敏度较低。ICP-MS 法具有分析速度快、检出限低、基体效应小、精密度高、灵敏度高、线性范围宽及多元素同时分析等优点。微波消解法利用微波快速加热, 在高压环境下进行消解, 具有消解速度快、污染小、样品消解完全、回收率高、用酸少、安全、污染程度低等优点<sup>[30-34]</sup>。

指纹图谱是近年来用于表征天然植物中多成分特征的一种综合性质量分析方法, 可以较为全面地反映出天然植物多成分体系的整体状况, 一般指纹图谱常用于天然植物内有机活性成分的分析。当前对莲子心的无机元素进行指纹图谱分析研究的报道相对较少。本研究运用 ICP-MS 法分析莲子心的金属元素, 以 4 大产区(湖南、江西、福建、湖北)收集的 65 份莲子心样品为研究对象, 分析测定其 19 种金属元素含量, 结合主成分分析法(principal component analysis, PCA)探讨不同产地莲子心中金属元素之间的差异, 以期对莲子心全面、客观、科学地进行品质评价提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

莲子心的样品分别从湖南省湘潭市、江西省赣州市和抚州市、福建省三明市和武夷山市、湖北省荆州市和宜城市共收集65份,样品具体信息详见表1,由康美药业股份有限公司质量管理部刘茂贵主任药师根据其性状特征分别鉴定为睡莲科植物莲的成熟种子中的干燥幼叶及胚根。浓硝酸(电子纯,天津市科密欧化学试剂有限公司)。标准品溶液具体信息详见表2。

表1 莲子心样品信息

样品编号	产地
HN-1~HN-11	湖南省湘潭市
JX-1~JX-5	江西省赣州市
JX-6~JX-16	江西省抚州市
FJ-1~FJ-8	福建省三明市
FJ-9~FJ-12	福建省武夷山市
SC-1~SC-3	四川省成都市
HB-1~HB-9	湖北省荆州市
HB-10~HB-23	湖北省宜城市

### 1.2 仪器与设备

CEM MARS6型微波消解仪(德国Berghof公司);7900型电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司);BSA 224S型万分之一电子分析天平(德国赛多利斯公司);Milli-Q型超纯水机(美国Millipore Bedford MA公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 对照品标准溶液的制备

多元素混合对照品溶液1的制备:取多元素混合标准溶液(含S、Mo、Pd、Re、Sb、Si、Sn、Ti、W)用10%硝酸配制成质量浓度分别为1、5、10、50、100、500、1000、5000 ng/mL混合对照品溶液。

多元素混合对照品溶液2的制备:取多元素混合标准溶液(含B、Na、Mg、K、Ca、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Cd、Ba)用10%硝酸配制成质量浓度分别为1、5、10、50、100、500、1000、5000、20000 ng/mL的混合对照品溶液。

多元素混合对照品溶液3的制备:分别取As、Pb标准溶液0.5 mL用10%硝酸定容至50 mL,配制成多元素混合对照品标准溶液(含As、Pb)母液,再用10%硝酸稀释母液配制成质量浓度分别为0.5、1.0、5.0、10.0、50.0、100.0 ng/mL的对照品溶液。

Hg单元素对照品溶液的制备:取Hg单元素标准溶液0.1 mL,用10%硝酸溶液定容至100 mL,配制成Hg元素标准溶液母液,质量浓度为1  $\mu\text{g/mL}$ 。再用10%硝酸稀释Hg元素母液配制成质量浓度分别为0.1、0.5、1.0、5.0、10.0 ng/mL的对照品溶液。

#### 1.3.2 混合内标溶液的制备

分别吸取Ge、In、Bi标准溶液0.5 mL用10%硝酸定容至50 mL,即为质量浓度为10  $\mu\text{g/mL}$ 的混合内标溶液。

#### 1.3.3 ICP-MS测定条件

以灵敏度、背景、稳定性等各项指标对仪器的工作参数进行优化。测定条件:等离子射频功率1550 W,等离子气体15 L/min,辅助气体流量1 L/min,雾化气流量1 L/min,补偿/稀释气体1 L/min,雾化室温度2  $^{\circ}\text{C}$ ,蠕动泵速度0.1 r/s。重复次数3次;数据采样模式:质谱图;采样锥/截取锥为镍锥;检测器模式为P/A;采样深度为10 mm;以 $^{72}\text{Ge}$ 、 $^{115}\text{In}$ 、 $^{209}\text{Bi}$ 为内标元素,监测信号的变动情况,能有效克服仪器信号的漂移和校正基体效应。

#### 1.3.4 供试品溶液制备

取莲子心样品粉末0.2 g(过40目筛),精密称定,于聚四氟乙烯消解罐中,置于通风橱,加入浓硝酸8 mL,浸泡过夜。第2 d放入微波消解仪中,按设定的消解程序(见表3)进行消解。消解完毕后,冷却至室温,取出消解罐,在通风橱中将酸挥尽,转移用去离子水定容至50 mL。

表2 标准品溶液信息

名称	来源	批号	质量浓度/ $(\mu\text{g/mL})$
标准溶液(含B、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Cd、Ba、W)	美国SPEX公司	2-192AB	1000
混合标准溶液(含S、Mo、Pd、Re、Sb、Si、Sn、Ti、W)	美国SPEX公司	1-194AB	1000
锆标准溶液(Ge)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1728-2004	1000
铟标准溶液(In)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1731-2004	1000
铋标准溶液(Bi)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1719-2004	1000
铅标准溶液(Pb)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1742-2004	1000
砷标准溶液(As)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1714-2004	1000
汞标准溶液(Hg)	中国计量科学研究院国家标准物质研究中心	GSB 04-1729-2004	1000

表 3 微波消解时间-温度程序

步骤	温度/°C	保温时间/min	压力/MPa
1	130	5	1.0
2	165	10	3.0
3	180	10	4.5

### 1.3.5 空白对照溶液制备

除不加莲子心样品粉末外,其余制备方法与供试品溶液的制备方法相同,制成空白对照溶液。

## 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据计算和统计,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 对实验数据进行统计分析,进行元素间相关性分析、主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 方法学考查

#### 2.1.1 线性关系

使用 1.3.1 配制好的各系列标准品工作溶液和 1.3.2 配制好的内标工作溶液,分别以各元素质量浓度为横坐标( $X$ ,  $\mu\text{g/mL}$ ),以样品溶液与内标工作溶液响应值的比值为纵坐标( $Y$ ),分别绘制标准曲线,得到各元素回归方程、相关系数和线性范围见表 4。结果表明 19 种金属元素在各自的线性范围内线性关系良好  $r \geq 0.99$ ,可满足方法学要求。

表 4 19 种金属元素的线性方程、线性范围、相关系数、重复性、精密度、稳定性、加标回收率及 RSDs ( $n=6$ )Table 4 Linear equations, linear ranges, correlation coefficients, repeatability, precision, stability, spike recovery, and RSDs of 19 kinds of metal elements ( $n=6$ )

元素	线性方程	线性范围 ( $\mu\text{g/mL}$ )	相关系数( $r$ )	重复性 RSDs/%	中间精密 度 RSDs/%	稳定性 RSDs/%	平均加标 回收率/%	回收率 RSDs/%
B	$Y=0.1133X+0.0091$	0~0.50	0.9999	0.89	0.34	0.41	99.61	2.78
Na	$Y=3.4459X+2.3091$	0~5.00	0.9997	2.34	0.16	3.35	99.36	1.17
Mg	$Y=1.2997X+0.0392$	0~20.00	0.9999	1.95	0.25	0.93	99.51	2.29
S	$Y=1.6518e^{-4}X+1.003$	0~5.00	0.9993	3.05	0.35	2.55	99.11	1.34
K	$Y=0.3219X+0.0124$	0~20.00	0.9998	1.45	0.30	0.57	99.20	0.84
Ca	$Y=0.0032X+1.9924e^{-4}$	0~2.00	0.9997	3.89	1.79	2.02	100.96	4.43
Mn	$Y=2.1235X+0.0018$	0~2.00	0.9999	2.52	1.02	2.59	99.00	2.27
Fe	$Y=4.3291X+0.0723$	0~2.00	0.9999	2.11	0.94	1.65	99.83	2.95
Ni	$Y=4.0008X+0.0121$	0~2.00	0.9998	1.90	1.79	2.55	98.17	2.08
Zn	$Y=0.7991X+0.0321$	0~2.00	1.0000	1.42	0.92	2.96	99.51	3.02
Sr	$Y=2.9238X+0.0113$	0~2.00	0.9998	2.96	1.31	4.13	99.61	3.06
Mo	$Y=0.1082X+6.9231e^{-4}$	0~2.00	0.9999	2.39	0.98	1.26	100.18	2.21
Sb	$Y=0.2312X+0.0114$	0~2.00	0.9999	3.29	1.69	1.68	101.71	2.40
Ba	$Y=0.1201X+3.2912e^{-4}$	0~2.00	0.9997	1.59	0.84	2.18	99.80	2.33
Cu	$Y=9.0326X+0.0019$	0~2.00	0.9999	0.46	0.27	0.25	98.77	1.80
As	$Y=0.5893X+1.008e^{-3}$	0~0.50	0.9995	1.35	1.35	2.11	97.92	2.38
Cd	$Y=6.0293X+4.0932e^{-5}$	0~2.00	0.9996	1.03	1.12	0.99	99.67	3.82
Hg	$Y=1.2938X+2.0018e^{-5}$	0~0.01	0.9998	2.24	1.32	1.93	100.86	2.81
Pb	$Y=6.5773X+2.0128e^{-3}$	0~1.00	0.9998	2.21	1.47	1.76	99.44	3.44

注: 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

### 2.1.2 精密度、稳定性实验

精密称取 0.2 g 莲子心样品粉末,制备供试品溶液,平行制备 6 份,测定 19 种元素的量。各元素的重复性 RSDs 在 0.46%~3.89%,表明方法的重复性良好。不同时间不同试验人员重新制备 6 份供试品溶液,测定 19 种元素的量,计算 12 份数据(包括重复性)的 RSD,作为中间精密度结果。中间精密度 RSDs 在 0.16%~1.79%,表明本方法中间精密度良好。

精密称取 0.2 g 莲子心样品粉末,制备供试品溶液,溶液在 2~8 °C 的条件下保存,分别于制样后 0、2、6、8、12、24 h 进样,测定 19 种元素的含量。各元素的稳定性 RSDs 在 0.25%~4.13%之间,表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好(见表 4)。

### 2.1.3 加标回收率试验

精密称取 0.2 g 莲子心样品粉末 6 份,分别加入与样品中所测定元素含量相当的对照品,分别加入一定量的各元素标准溶液,制备加样供试品溶液,分别进行测定,计算得到各元素的平均回收率在 97.92%~101.71%之间,回收率 RSDs 在 0.84%~4.43%之间。结果表明回收率良好。

## 2.2 金属元素含量分析

莲子心样品 19 种金属元素含量存在一定的差异,其中元素 Mg、S、K 的含量较高,达到 g/kg 数量级;其次含量较高的元素为 B、Na、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn,

而 Ni、Sr、Mo、Sb、Ba、As、Cd、Hg、Pb 的含量较低。从测定结果可以看出, 所收集的莲子心样品中, 大多数金属元素的量均有明显差异, 同一元素在不同产地之间的含量存在较大差异, 如 Mg 元素含量最高值为 1833.23 mg/kg, 最低值为 209.38 mg/kg, K 元素含量最高值为 1402.98 mg/kg, 最低值为 923.19 mg/kg。就有害金属元素而言, 所有平均含量由高到低依次为 Cu、Pb、Cd、As、Hg。在测定的 65 种莲子心样品中, Cu 在 1.92~13.26 mg/kg, 均值 4.33 mg/kg; Cd 在 0.02~0.17 mg/kg, 均值为 0.11 mg/kg; Pb 在 0.00~1.27 mg/kg, 均值为 0.14 mg/kg; As 在 0.00~0.25 mg/kg, 均值为 0.06 mg/kg; Hg 在 0.00~0.22 mg/kg, 均值为 0.03 mg/kg。2020 年版中国药典已经制定了重金属及有害元素一致性限量指导值 Pb 不得过 5 mg/kg, Cd 不得过 1 mg/kg, As 不得过 2 mg/kg, Hg 不得过 0.2 mg/kg, Cu 不得过 20 mg/kg。65 份样品中有 2 份 Hg 元素超标, 超标率为 3%。

### 2.2.1 金属元素指纹图谱建立

由于莲子心样品中 19 种金属元素含量差别较大, 通过金属元素指纹图谱可以比较直观的感受各地区之间金属元素的含量差异。为了使金属元素指纹图谱更加直观, 便

于绘制, 将不同元素的含量扩大或缩小至统一数量级(Mg、S、K 缩小 100 倍, Fe、Sr、Mo、Ba、Pb 扩大 10 倍, Ni、Sb、As、Cd、Hg 扩大 10 倍), 以元素种类为横坐标(X), 相对含量为纵坐标(Y), 绘制指纹图谱见图 1。取不同产地莲子心样品金属元素含量的平均值绘制指纹图谱见图 2。

### 2.2.2 金属元素间相关性

为进一步分析莲子心中各元素之间的相关性。运用 SPSS 26.0 计算 19 种元素的皮尔逊(Pearson)相关系数(表 5)。结果表明不同地区莲子心中金属元素之间存在一定的相互作用关系。B-Mg、B-Mo、Mg-K、Mg-Hg 和 Ca-Mn 元素间达到极显著正相关( $P<0.01$ )。B-Na、B-As、Mg-As、S-Hg、K-Cd、K-Hg、Ca-Cu、Fe-As 和 Sb-Hg 元素间达到显著正相关( $P<0.05$ )。B-Mn、Mg-Ca、Mg-Mn、K-Ca、Ca-Cd、Mn-Mo 和 Ni-Sr 元素间达到极显著负相关( $P<0.01$ )。B-Ca、Na-Mn、Mg-Pb、K-Mn、Mn-As、Sr-Cu 和 Mo-Ba 元素间达到显著负相关( $P<0.05$ )。

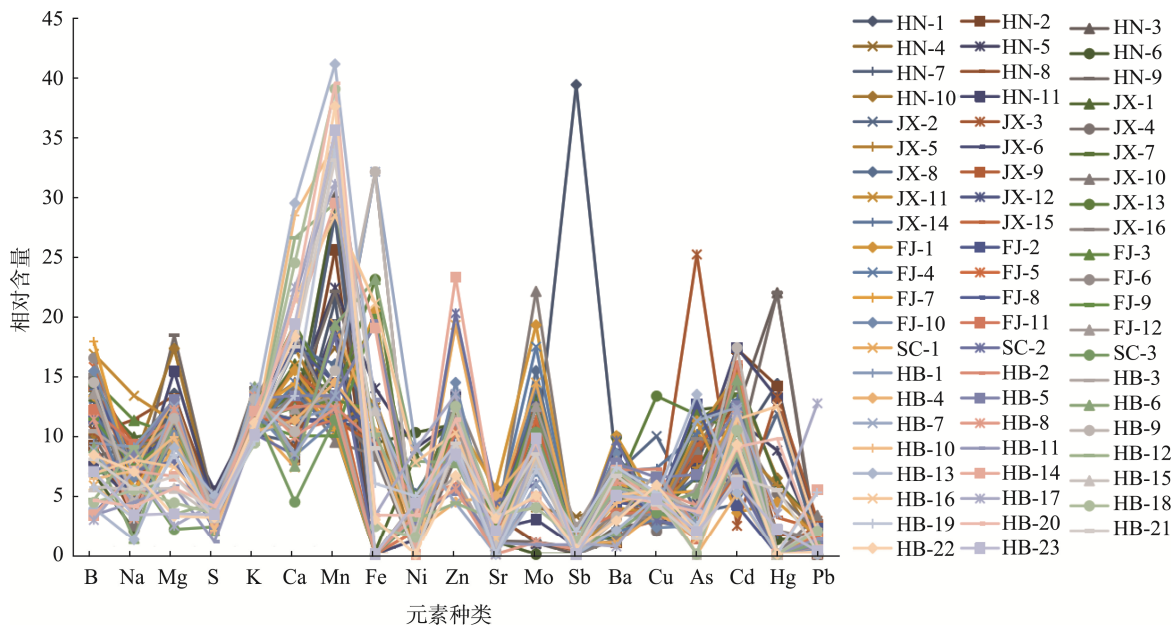


图 1 65 份莲子心样品中 19 种金属元素的指纹图谱

Fig.1 Fingerprint of 19 kinds of metal elements in 65 *Nelumbo nucifera* Gaertn. samples

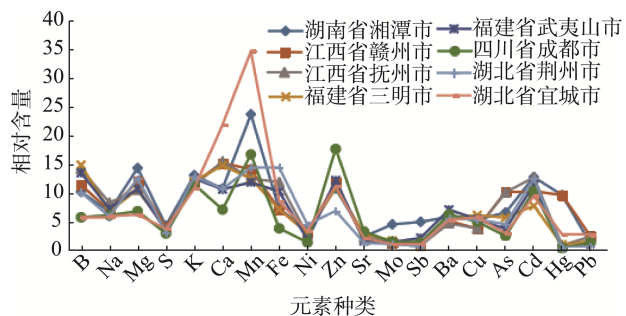


图 2 不同产地莲子心中 19 种金属元素的指纹图谱

Fig.2 Fingerprint of 19 kinds of metal elements from different origins of *Nelumbo nucifera* Gaertn.

### 2.2.3 金属元素间主成分分析

主成分分析是利用降维的方式将原始多个变量拟合为少数的几个主成分, 且尽可能多地保留原始变量的信息, 为进一步探索不同产地莲子心金属元素间的关系, 运用 SPSS 26.0 进行主成分分析。主成分的特征值(大于 1)及方差贡献率是选择主成分的依据, 结果提取到 8 个主成分因子。主成分因子的特征值和方差贡献率见表 6。

为进一步确定造成质量差异的主要金属元素, 通过成分矩阵筛选出特征元素见表 7。表 7 是经方差最大正交旋转后的成分矩阵。其中可以看出第 1 个主因子和 Ca 呈高度负相关; 第 2 个主因子和 B 呈高度正相关, 和 Mn 呈高度负相

关;第 3 个主因子和 Sr 呈高度负相关;第 4 个主因子和 Zn、Pb 呈高度正相关;第 5 个主因子和 S 呈高度正相关;第 6 个主因子和 Fe、As 高度正相关;第 7 个主因子和 Sb 呈高度正

相关;第 8 个主因子和 Ba 呈高度正相关;所以可以认为 B、S、Ca、Mn、Fe、Zn、Sr、Sb、Ba、As、Pb 是莲子心的特征金属元素。旋转变换后的成分得分系数矩阵见表 8。

表 5 各元素之间的 Pearson 相关性系数  
Table 5 Pearson correlation coefficients between elements

	B	Na	Mg	S	K	Ca	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Mo	Sb	Ba	Cu	As	Cd	Hg	Pb
B	1.000																		
Na	0.245*	1.000																	
Mg	0.394**	0.018	1.000																
S	0.096	0.171	0.110	1.000															
K	0.180	-0.128	0.566**	-0.011	1.000														
Ca	-0.316*	0.037	-0.507**	0.156	-0.506**	1.000													
Mn	-0.733**	-0.300*	-0.430**	0.119	-0.264*	0.524**	1.000												
Fe	0.060	-0.070	0.091	-0.072	0.135	0.012	-0.118	1.000											
Ni	-0.118	-0.016	-0.051	0.157	0.005	0.034	0.102	0.040	1.000										
Zn	-0.123	0.046	-0.169	0.040	-0.169	-0.032	0.056	-0.074	-0.222	1.000									
Sr	-0.037	0.068	-0.067	0.020	-0.162	-0.078	0.010	0.088	-0.389**	0.190	1.000								
Mo	0.396**	0.112	-0.142	-0.050	-0.238	0.032	-0.440**	0.053	-0.083	0.138	0.164	1.000							
Sb	-0.047	-0.086	0.123	-0.010	0.241	-0.143	0.024	-0.122	-0.145	0.023	0.020	-0.013	1.000						
Ba	-0.034	-0.056	0.039	-0.102	-0.054	-0.148	-0.022	0.013	-0.120	0.076	0.006	-0.308*	0.124	1.000					
Cu	-0.096	0.120	-0.100	-0.061	-0.090	0.261*	0.062	0.116	-0.035	-0.234	-0.273*	0	-0.075	0.045	1.000				
As	0.312*	-0.040	0.290*	0.164	0.165	-0.033	-0.315*	0.279*	-0.030	-0.120	0.037	0.165	-0.074	0.030	-0.093	1.000			
Cd	0.161	0.088	0.210	0.068	0.274*	-0.342**	-0.138	0.072	0.209	0.008	-0.233	-0.148	-0.050	-0.131	-0.047	-0.028	1.000		
Hg	-0.131	-0.030	0.354**	0.255*	0.256*	-0.101	0.184	-0.124	-0.018	0.032	0.101	-0.227	0.258*	-0.052	-0.099	0.028	-0.029	1.000	
Pb	-0.177	0.084	-0.305*	0.179	-0.234	0.226	0.095	-0.013	0.206	0.339**	-0.088	0.133	-0.078	-0.175	0.003	0.119	0.075	-0.052	1.000

注: \*为差异显著( $P<0.05$ ); \*\*为差异极显著( $P<0.01$ )。

表 6 主成分的特征值及方差贡献率  
Table 6 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

主成分 因子	初始特征值			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积百分比/%	总计	方差百分比/%	累积百分比/%
1	3.241	17.059	17.059	2.480	13.054	13.054
2	2.261	11.902	28.961	2.420	12.735	25.789
3	1.896	9.977	38.938	1.739	9.152	34.941
4	1.663	8.754	47.692	1.608	8.466	43.406
5	1.387	7.301	54.993	1.520	7.998	51.404
6	1.275	6.712	61.705	1.465	7.710	59.114
7	1.111	5.846	67.550	1.333	7.015	66.129
8	1.010	5.318	72.868	1.280	6.739	72.868

表 7 旋转变换后的成分矩阵  
Table 7 Component matrix after rotation transformation

元素	主成分因子							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0.230	0.815	-0.028	-0.131	0.048	0.134	-0.036	-0.066
Na	-0.147	0.545	0.026	0.047	0.396	-0.341	-0.294	0.174
Mg	0.617	0.271	0.000	-0.334	0.305	0.211	0.201	0.103
S	-0.056	0.021	0.051	0.126	0.816	0.065	-0.070	-0.086
K	0.683	0.025	0.165	-0.264	0.068	0.193	0.313	-0.007
Ca	-0.808	-0.271	0.094	0.011	0.163	0.054	-0.087	-0.120
Mn	-0.326	-0.854	0.009	0.027	0.138	-0.157	-0.009	-0.019
Fe	0.033	-0.013	0.002	-0.064	-0.140	0.719	-0.226	0.076
Ni	0.115	-0.203	0.602	0.054	0.115	0.045	-0.265	-0.279
Zn	0.051	-0.017	-0.288	0.788	-0.014	-0.138	0.051	0.142
Sr	-0.030	-0.009	-0.859	0.061	0.072	0.043	-0.108	-0.048
Mo	-0.284	0.613	-0.160	0.213	-0.229	0.103	0.111	-0.478
Sb	0.110	-0.019	-0.007	0.050	0.012	-0.140	0.821	0.073
Ba	0.031	-0.054	-0.076	0.040	-0.109	0.075	0.071	0.875
Cu	-0.490	0.117	0.454	-0.304	-0.039	0.005	0.067	0.281
As	0.036	0.275	-0.031	0.043	0.230	0.780	0.071	-0.013
Cd	0.582	0.070	0.409	0.162	0.044	-0.103	-0.295	-0.036
Hg	0.235	-0.253	-0.151	-0.108	0.606	-0.052	0.413	-0.054
Pb	-0.220	-0.035	0.294	0.760	0.157	0.137	-0.016	-0.153

表 8 旋转变换后的成分得分系数矩阵  
Table 8 Score coefficient matrix of components after rotation transformation

元素	主成分因子							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0.013	0.331	-0.001	-0.062	0.044	-0.003	-0.019	-0.025
Na	-0.099	0.303	0.010	-0.011	0.321	-0.297	-0.227	0.212
Mg	0.177	0.064	-0.010	-0.141	0.182	0.083	0.065	0.056
S	-0.057	0.028	0.001	0.048	0.549	0.039	-0.072	0.002
K	0.239	-0.051	0.097	-0.075	-0.010	0.097	0.179	-0.057
Ca	-0.351	-0.050	0.047	-0.080	0.142	0.095	0.024	-0.058
Mn	-0.063	-0.341	-0.033	-0.038	0.088	-0.018	-0.026	-0.041
Fe	0.010	-0.092	-0.028	-0.004	-0.087	0.513	-0.173	0.079
Ni	0.096	-0.105	0.304	0.038	0.040	0.029	-0.157	-0.190
Zn	0.097	0.007	-0.106	0.529	-0.021	-0.047	0.051	0.169
Sr	0.030	-0.056	-0.537	-0.038	0.080	0.034	-0.193	-0.063
Mo	-0.158	0.270	-0.041	0.094	-0.158	0.035	0.201	-0.350
Sb	-0.042	0.048	0.105	0.107	-0.039	-0.075	0.665	0.015
Ba	-0.018	0.011	0.008	0.123	-0.028	0.091	0.011	0.707
Cu	-0.302	0.140	0.300	-0.179	0.012	0.008	0.148	0.244
As	-0.065	0.058	-0.004	0.078	0.146	0.538	0.082	0.040
Cd	0.308	-0.012	0.204	0.156	-0.006	-0.111	-0.253	-0.002
Hg	0.050	-0.105	-0.091	-0.063	0.374	-0.028	0.239	-0.071
Pb	-0.051	0.015	0.225	0.506	0.073	0.150	0.115	-0.016

计算 8 个主成分因子的表达式, 主成分因子分别用  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8$ , 表达式如下:

$$Y_1=0.013 \times B-0.099 \times Na+0.177 \times Mg-0.057 \times S+0.239 \times K-0.351 \times Ca-0.063 \times Mn+0.010 \times Fe+0.096 \times Ni+0.097 \times Zn+0.030 \times Sr-0.158 \times Mo-0.042 \times Sb-0.018 \times Ba-0.302 \times Cu-0.065 \times As+0.308 \times Cd+0.05 \times Hg-0.051 \times Pb$$

$$Y_2=0.331 \times B+0.303 \times Na+0.064 \times Mg+0.028 \times S-0.051 \times K-0.050 \times Ca-0.341 \times Mn-0.092 \times Fe-0.105 \times Ni+0.007 \times Zn-0.056 \times Sr+0.270 \times Mo+0.048 \times Sb+0.011 \times Ba+0.140 \times Cu+0.058 \times As-0.012 \times Cd-0.105 \times Hg+0.015 \times Pb$$

$$Y_3=-0.001 \times B+0.010 \times Na-0.010 \times Mg+0.001 \times S+0.097 \times K+0.047 \times Ca-0.033 \times Mn-0.028 \times Fe+0.304 \times Ni-0.106 \times Zn-0.537 \times Sr-0.041 \times Mo+0.105 \times Sb+0.008 \times Ba+0.300 \times Cu-0.004 \times As+0.204 \times Cd-0.091 \times Hg+0.225 \times Pb$$

$$Y_4=-0.062 \times B-0.011 \times Na-0.141 \times Mg+0.048 \times S-0.075 \times K-0.080 \times Ca-0.038 \times Mn-0.004 \times Fe+0.038 \times Ni+0.529 \times Zn-0.038 \times Sr+0.094 \times Mo+0.107 \times Sb+0.123 \times Ba-0.179 \times Cu+0.078 \times As+0.156 \times Cd-0.063 \times Hg+0.506 \times Pb$$

$$Y_5=0.044 \times B+0.321 \times Na+0.182 \times Mg+0.549 \times S-0.010 \times K+0.142 \times Ca+0.088 \times Mn-0.087 \times Fe+0.040 \times Ni-0.021 \times Zn+0.080 \times Sr-0.158 \times Mo-0.039 \times Sb-0.028 \times Ba+0.012 \times Cu+0.146 \times As-0.006 \times Cd+0.374 \times Hg+0.073 \times Pb$$

$$Y_6=-0.003 \times B-0.297 \times Na+0.083 \times Mg+0.039 \times S+0.097 \times K+0.095 \times Ca-0.018 \times Mn+0.513 \times Fe+0.029 \times Ni-0.047 \times Zn+0.034 \times Sr+0.035 \times Mo-0.075 \times Sb+0.091 \times Ba+0.008 \times Cu+0.538 \times As-0.111 \times Cd-0.028 \times Hg+0.150 \times Pb$$

$$Y_7=-0.019 \times B-0.227 \times Na+0.065 \times Mg-0.072 \times S+0.179 \times K+0.024 \times Ca-0.026 \times Mn-0.173 \times Fe-0.157 \times Ni+0.051 \times Zn-0.193 \times Sr+0.201 \times Mo+0.665 \times Sb+0.011 \times Ba+0.148 \times Cu+0.082 \times As-0.253 \times Cd+0.239 \times Hg+0.115 \times Pb$$

$$Y_8=-0.025 \times B+0.212 \times Na+0.056 \times Mg+0.002 \times S-0.057 \times K-0.058 \times Ca-0.041 \times Mn+0.079 \times Fe-0.190 \times Ni+0.169 \times Zn-0.063 \times Sr-0.350 \times Mo+0.015 \times Sb+0.707 \times Ba+0.244 \times Cu+0.040 \times As-0.002 \times Cd-0.071 \times Hg-0.016 \times Pb$$

结合表 6 主成分因子的特征值和方差贡献率的数据。

得到主成分因子总值  $Y_{总}$  表达式如下:

$$Y_{总}=Y_1 \times 13.054/72.868+Y_2 \times 12.735/72.868+Y_3 \times 9.152/72.868+Y_4 \times 8.466/72.868+Y_5 \times 7.998/72.868+Y_6 \times 7.710/72.868+Y_7 \times 7.015/72.868+Y_8 \times 6.739/72.868=0.053 \times B+0.037 \times Na+0.065 \times Mg+0.058 \times S+0.058 \times K-0.052 \times Ca-0.078 \times Mn+0.017 \times Fe+0.016 \times Ni+0.080 \times Zn-0.088 \times Sr-0.002 \times Mo+0.080 \times Sb+0.087 \times Ba+0.026 \times Cu+0.092 \times As+0.060 \times Cd+0.026 \times Hg+0.114 \times Pb$$

在  $Y_{总}$  表达式中以每种元素的系数来代表金属元素与主成分分析综合得分的相关性, 见图 3。根据  $Y_{总}$  表达式, 与主成分分析的结果呈正相关的元素的相关性从大到小依次为 Pb、As、Ba、Zn、Sb、Mg、Cd、K、S、B、Na、Hg、Cu、Fe、Ni; 呈负相关的元素的相关性从大到小依次为 Sr、Mn、Ca、Mo。

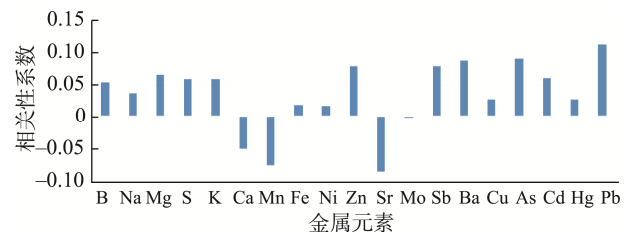


图 3 莲子心不同金属元素与主成分分析综合得分的相关性  
Fig.3 Correlation between different metal elements and the comprehensive score of principal component analysis of *Nelumbo nucifera* Gaertn.

### 3 结论与讨论

基体效应主要来源于样品基体或酸溶剂中的元素和等离子体用的氩气中的杂质。由于基体效应会对待测元素产生一定的干扰作用。本研究通过在线加入内标 Ge、In、Bi 元素的方法来校正基体效应和干扰。其中 B、Na、Mg、

S、K、Ca、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As 以 Ge 作为内标准溶液, Sr、Mo、Sb、Ba、Cd 以 In 作为内标准溶液, Hg、Pb 以 Bi 作为内标准溶液。内标元素回收率在 80%~120%之间, 能有效地校正分析信号的漂移。

近年来, 金属元素已作为食品的质量评估和安全性评价的指标之一, 其中食用植物生长所需的土壤、气候、水文等生态因子对矿物元素的积累有着至关重要的作用。本研究建立了 ICP-MS 测定莲子心 19 种金属元素含量的方法, 本方法准确性高, 灵敏度好。本研究采用 ICP-MS 分析 65 批不同产地莲子心样品中 19 种金属元素, 所收集的莲子心样品中, 大多数金属元素的量均有明显差异, 同一元素在不同产地之间的含量存在较大差异。其中元素 Mg、S、K 的含量较高, 达到 g/kg 数量级; 运用 SPSS 26.0 计算 19 种元素的 Pearson 相关系数结果表明不同地区莲子心中金属元素之间存在一定的相互作用关系。进一步对不同产地莲子心金属元素含量进行主成分分析。主成分的特征值(大于 1)及方差贡献率是选择主成分的依据, 结果提取到 8 个主成分因子。通过主成分分析和特征元素分析发现不同地区生长的莲子心金属元素含量的差异较大, B、S、Ca、Mn、Fe、Zn、Sr、Sb、Ba、As 和 Pb 这 11 种特征元素可能是湖南省湘潭市、江西省赣州市、江西省抚州市、福建省三明市、福建省武夷山市、四川省成都市、湖北省荆州市、湖北省宜城市等地区莲子心中金属元素关键的差异标志物。通过对不同产地的莲子心金属元素分析比较能为莲子心的质量控制及安全性评价提供依据, 为莲子心产地溯源模型的建立提供数据支持。

## 参考文献

- [1] 李芳琼, 何冬梅, 王海, 等. 根际土壤无机元素与川芎“菊花心”纹理形成的关联性研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(21): 5150-5159.  
LI FQ, HE DM, WANG H, *et al.* Relationship between inorganic elements in rhizosphere soil and rhizome radial striations in *Ligusticum chuanxiong* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(21): 5150-5159.
- [2] 李欣, 高天鹏, 王娟弟, 等. 甘肃不同产地当归中 22 种无机元素含量测定及主成分分析[J]. 甘肃中医药大学学报, 2024, 41(1): 61-70.  
LI X, GAO TP, WANG JD, *et al.* Determination and principal component analysis of 22 inorganic elements in *angelica sinensis* from different regions in Gansu Province [J]. Journal of Gansu University of Chinese Medicine, 2024, 41(1): 61-70.
- [3] 尹亚玲, 姚艺新, 王晓晓, 等. 赤芍中 24 种无机元素分析[J]. 亚太传统医药, 2022, 18(6): 53-60.  
YING YL, YAO YX, WANG XX, *et al.* Analysis of 24 inorganic elements in *Paeonialatiflora pall* [J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2022, 18(6): 53-60.
- [4] 史静超, 张俊杰, 高晓霞, 等. 龟龄集胶囊无机元素指纹图谱的建立及主成分分析[J]. 中草药, 2018, 49(15): 3619-3624.  
SHI JC, ZHANG JJ, GAO XX, *et al.* Construction of inorganic elemental fingerprint and principal component analysis of Guilingji capsule [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(15): 3619-3624.
- [5] 黄璐琦, 郭兰萍. 环境胁迫下次生代谢产物的积累及道地药材的形成[J]. 中国中药杂志, 2007, 32(4): 172-280.  
HUANG LQ, GUO LP. Accumulation of secondary metabolites and formation of authentic medicinal materials under environmental stress [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2007, 32(4): 172-280.
- [6] 李道成, 朱灵芝, 王裕成, 等. 茯苓中 24 种无机元素的测定及健康风险评估[J]. 南方林业科学, 2024, 52(3): 30-39.  
LI DC, ZHU LZ, WANG YC, *et al.* Determination of 24 inorganic elements in *Poria cocos* and health risk assessment [J]. South China Forestry Science, 2024, 52(3): 30-39.
- [7] 李海燕, 尹盼盼, 彭腾腾, 等. 甘草中 20 种无机元素的测定及对有害元素的健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 281-291.  
LI HY, YIN PP, PENG TT, *et al.* Determination of 20 kinds of inorganic elements in *Glycyrrhizae radix et rhizoma* and their health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 281-291.
- [8] 董洋利, 陈金佩, 姚艺新, 等. 莲子、莲子心和莲房中 15 种无机元素的比较[J]. 西北药学杂志, 2020, 35(4): 504-509.  
DONG YL, CHEN JP, YAO YX, *et al.* Comparison of 15 inorganic elements among *Nelumbinis semen*, *Nelumbinis plumula* and *Receptaculum nelubinis* [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2020, 35(4): 504-509.
- [9] 熊婵, 黎庆, 马庆伟. 人体微量元素检测方法及临床应用的研究进展[J]. 中国全科医学, 2018, 21(8): 888-895.  
XIONG C, LI Q, MA QW. Recent advances in human trace element determination methods and clinical application [J]. Chinese General Practice, 2018, 21(8): 888-895.
- [10] 黄作明, 黄珣. 微量元素与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2010, 27(6): 58-62.  
HUANG ZM, HUANG X. Trace elements and human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2010, 27(6): 58-62.
- [11] 郭亚, 张学欢, 丁维莲. 无机元素缺乏或过量对儿童健康的影响[J]. 广州化工, 2020, 48(10): 35-37.  
GUO Y, ZHANG XH, DING WL. Effects of inadequate or excessive intake of inorganic elements on children's health [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(10): 35-37.
- [12] 杨宽, 胡光辉, 杨蕊蕊, 等. 不同产地梔子中 32 种矿物元素含量分析及其产地鉴别[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 193-199.  
YANG K, HU GH, YANG RR, *et al.* Analysis of the content of 32 kinds of mineral elements and identification of origin in *Gardenia jasminoides* from different locations [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 193-199.
- [13] 李超, 崔占虎, 黄显章, 等. 不同产地艾叶 35 种矿物元素的分析与评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1350-1354.  
LI C, CUI ZH, HUANG XZ, *et al.* Analysis and evaluation of 35 mineral elements in *Artemisia argyi* from different origin [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1350-1354.
- [14] 张家春, 戚燕强, 韩见宇, 等. 不同龄白及块茎无机元素与药效成分分布特征及相关性研究[J]. 中药材, 2019, 42(2): 285-288.  
ZHANG JC, QI YQ, HAN JY, *et al.* Distribution characteristics and correlation of inorganic elements and effective components of *Bletilla striata* tubers in different ages [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2019, 42(2): 285-288.

- [15] 李振凯, 王红, 宋乐, 等. 基于无机元素、有效成分银柴胡产地特征及关联分析[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(7): 894-902.  
LI ZK, WANG H, SONG L, *et al.* Origin characteristics and correlation analysis of *Stellariae* radix based on inorganic elements and effective components [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2023, 40(7): 894-902.
- [16] 魏小成, 李成义, 周瑞娟, 等. 无机元素与中药关系研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(7): 140-144.  
WEI XC, LI CY, ZHOU RJ, *et al.* Research progress on the relationship between inorganic elements and traditional Chinese medicine [J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2022, 29(7): 140-144.
- [17] 刘小云, 孙建云, 李拥军, 等. 黄芪、红芪中无机元素含量差异比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 4028-4035.  
LIU XY, SUN JY, LI YJ, *et al.* Comparison of difference of inorganic elements content between *Radix astragalii* and *Radix hedysari* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(12): 4028-4035.
- [18] 孙天雄, 李成义, 贾妙婷, 等. 红芪中的无机元素及其与药效活性成分关系的研究进展[J]. 中国现代中药, 2021, 23(12): 2196-2200.  
SUN TX, LI CY, JIA MT, *et al.* Progress in research on the relationship between inorganic elements and effective ingredients in *Hedysari radix* [J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(12): 2196-2200.
- [19] 张柯瑶, 郭惠, 王媚, 等. 扶正固本类中药中微量元素含量测定及药效关系研究[J]. 陕西中医, 2017, 38(3): 398-400.  
ZHANG KY, GUO H, WANG M, *et al.* The elements content determination of Fuzheng Guben and the relationship study between content and efficacy [J]. Shaanxi Journal of Traditional Chinese Medicine, 2017, 38(3): 398-400.
- [20] 孙长峰, 郭娜. 微量元素铁对人体健康的影响[J]. 微量元素与健康研究, 2011, 28(2): 64-66.  
SUN CF, GUO N. Effects of trace element iron on human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2011, 28(2): 64-66.
- [21] 郑礼胜, 刘学中, 崔艳丽, 等. 中药里 Fe 元素的研究进展[J]. 药物评价研究, 2016, 39(4): 677-685.  
ZHENG LS, LIU XZ, CUI YL, *et al.* Research progress on Fe element in Chinese materia medica [J]. Drug Evaluation Research, 2016, 39(4): 677-685.
- [22] 刘武忠, 王剑明, 张红, 等. 钴及其化合物对人体健康的影响[J]. 职业卫生与应急救援, 2016, 34(2): 111-113.  
LIU WZ, WANG JM, ZHANG H, *et al.* Health effects of cobalt and its compounds [J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2016, 34(2): 111-113.
- [23] 颜世铭. 钴的生理作用及其与健康的关系[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(7): 19.  
YAN SM. Health effects of cobalt and its compounds [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2008, 15(7): 19.
- [24] 吴茂江. 镍与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2014, 31(1): 74-75.  
WU MJ. Nickel and human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2014, 31(1): 74-75.
- [25] 吴茂江. 钼与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(5): 66-67.  
WU MJ. Molybdenum and human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2006, 23(5): 66-67.
- [26] 位秀丽, 张秀琴, 周毅德. 锶与人体健康关系[J]. 微量元素与健康研究, 2020, 37(5): 70-72.  
WEI XL, ZHANG XQ, ZHOU YD. The relationship between strontium and human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2020, 37(5): 70-72.
- [27] 李丽敏, 曹帅, 季申. 中药中重金属及有害元素控制的思考与建议[J]. 中国食品药品监管, 2022, 2: 104-109.  
LI LM, CAO S, JI S. Thoughts and suggestions on the control of heavy metals and harmful elements in traditional Chinese medicine [J]. China Food & Drug Administration Magazine, 2022, 2: 104-109.
- [28] 左甜甜, 金红宇, 张磊, 等. 根和根茎类中药材中铅和砷致癌性风险评估研究[J]. 中国药事, 2021, 35(6): 661-665.  
ZUO TT, JIN HY, ZHANG L, *et al.* A study to carcinogenic risk assessment of Pb & As in root and rhizome medicinal materials [J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2021, 35(6): 661-665.
- [29] 孙承业. 重金属健康危害形势及控制策略[J]. 中国工业医学杂志, 2014, 27(4): 243.  
SUN CY. The situation and control strategies of heavy metal health hazards [J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2014, 27(4): 243.
- [30] 陈秋玲, 祝芷琦, 李咏华, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定蛋黄卵磷脂中15种金属元素[J]. 中国油脂, 2022, 47(2): 129-135.  
CHEN QL, ZHU ZQ, LI YH, *et al.* Determination of 15 kinds of metal elements in egg yolk lecithin by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(2): 129-135.
- [31] 李旭, 吴维吉, 刘佳, 等. 微波灰化电感耦合等离子体质谱法测定小麦中6种金属元素含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(4): 866-869.  
LI X, WU WJ, LIU J, *et al.* Determination of 6 kinds of metal elements in wheat by microwave ashing and inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(4): 866-869.
- [32] 孙清海, 罗兆亮. 微波消解-ICP-MS 法测定盐酸阿比朵尔中5种金属元素残留[J]. 中南药学, 2020, 18(12): 1279-1281.  
SUN HQ, LUO ZL. Determination of 5 metal elements in arbidol hydrochloride by microwave digestion and ICP-MS [J]. Central South Pharmacy, 2020, 18(12): 1279-1281.
- [33] 孔维恒, 严华, 徐姗, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定橄榄油中的18种金属元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(11): 4330-4335.  
KONG WH, YAN H, XU S, *et al.* Simultaneous determination of 18 metal elements in olive oil by microwave digestion-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(11): 4330-4335.
- [34] 薛梅, 邢常瑞, 孙梦璐, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定桃胶中22种矿物元素含量[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(4): 1-7.  
XUE M, XING CR, SUN ML, *et al.* Simultaneous determination of 18 metal elements in olive oil by microwave digestion-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(4): 1-7.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)