DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251023004
引用格式: 刘喜婵, 黄博, 黄清泉, 等. 基于电感耦合等离子体质谱法的肉桂中 15 种无机元素差异性分析及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 176–184.
LIU XC, HUANG B, HUANG QQ, *et al*. Difference analysis and health risk assessment of 15 kinds of inorganic elements in *Cinnamomum cassia* Presl based on inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 176–184. (in Chinese with English abstract).

基于电感耦合等离子体质谱法的肉桂中 15 种无机元素差异性分析及健康风险评估

刘喜婵[1#], 黄　博[2#], 黄清泉[2], 吴玉强[3*], 罗　轶[2*]

(1. 广西中医药大学药学院, 南宁　530200; 2. 广西壮族自治区药品检验研究院, 南宁　530021;
3. 广西中医药大学百年乐制药有限公司, 南宁　530023)

摘　要: 目的　探究肉桂不同处理组(带皮、刮皮、粗皮)的 15 种无机元素含量分布差异, 评估刮皮工艺对重金属风险的控制作用。**方法**　采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)测定 3 组样品中无机元素含量, 通过单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)进行差异性分析, 并开展重金属及有害元素风险评估。**结果**　粗皮组 10 种无机元素(Cr、Co、Ni、Cu、As、Pb 等)含量显著高于带皮组和刮皮组(P<0.05), 其中 Pb 含量远超 2020 版《中国药典》标准(不合格率 90.9%); OPLS-DA 筛选出 Sr、Pb、Cu、Rb 为区分粗皮与其他两组的特征元素; 健康风险评估显示, 3 组元素每日摄入量均在安全范围, 但粗皮组风险较高。**结论**　本研究采用的 ICP-MS 测定肉桂中无机元素含量的方法简便、可靠; 粗皮对于这 10 种元素具有显著的富集作用, 炮制时去除粗皮可降低重金属暴露风险, 为其质量控制提供参考。

关键词: 肉桂; 刮皮; 无机元素; 统计分析

Difference analysis and health risk assessment of 15 kinds of inorganic elements in *Cinnamomum cassia* Presl based on inductively coupled plasma-mass spectrometry

LIU Xi-Chan[1#], HUANG Bo[2#], HUANG Qing-Quan[2], WU Yu-Qiang[3*], LUO Yi[2*]

(1. *Guangxi University of Chinese Medicine*, *Nanning* 530200, *China*; 2. *Guangxi Institute for Drug Control*, *Nanning* 530021, *China*; 3. *Guangxi University of Chinese Medicine Bainianle Pharmaceutical Co.*, *Ltd.*, *Nanning* 530023, *China*)

收稿日期: 2025-10-23
基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA23023035); 国家药品监督管理局药品监督科学体系建设重点项目(RS2024Z006); 广西药品监督管理局科研计划项目(桂药监科 2022-05)
#刘喜婵和黄博为共同第一作者
第一作者: 刘喜婵(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为中药制剂研究与开发。E-mail: liuxichan2023@stu.gxtcmu.edu.cn
黄博(1981—), 男, 副主任药师, 主要研究方向为中药质量控制及安全。E-mail: 137968757@qq.com
***通信作者:** 吴玉强(1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为中药成分分析与质量控制。E-mail: 409444015@qq.com
罗轶(1972—), 女, 主任药师, 主要研究方向为中药质量与安全。E-mail: luoyi20010211@163.com

ABSTRACT: Objective　To explore the distribution differences of 15 kinds of inorganic elements in different processing groups of *Cinnamomum cassia* Presl (with bark, scraped bark and rough bark) and assess the effect of the bark-scraping process on the control of heavy metal risks. **Methods**　The content of inorganic elements in the 3 groups of samples was determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). Difference analysis was performed using one-way ANOVA, principal component analysis (PCA), and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA), and risk assessment of heavy metals and harmful elements was conducted. **Results**　The content of 10 kinds ofinorganic elements (Cr, Co, Ni, Cu, As, Pb, *etc*.) in the rough bark group was significantly higher than that in the with-bark group and the rough bark group (P<0.05). Among them, the Pb content far exceeded the standards of the 2020 edition of Chinese pharmacopoeia (with a failure rate of 90.9%). OPLS-DA identified Sr, Pb, Cu and Rb as characteristic elements distinguishing the rough bark group from the other two groups. Health risk assessment showed that the daily intake of elements in the 3 groups was within the safe range, but the risk in the rough bark group was relatively higher. **Conclusion**　The ICP-MS method adopt in this study for determining the content of inorganic elements in *Cinnamomum cassia* Presl simple and reliable. The rough bark has a significant enrichment effect on these 10 kinds ofelements, and removing the rough bark during processing can reduce the risk of heavy metal exposure. This study can provide references for its quality control.

KEY WORDS: *Cinnamomum cassia* Presl; bark; inorganic elements; statistical analysis

0　引　言

肉桂为樟科植物肉桂(*Cinnamomum cassia* Presl)的干燥树皮, 主要分布在我国的广东、广西、云南、福建等地。肉桂性味辛、甘, 归肾、脾、心、肝经, 具有补火助阳, 散寒止痛, 温通经脉等功效[1]。现代研究表明, 肉桂含有丰富的挥发油、黄烷醇类、萜类、木脂素类等[2−5]功效成分, 具有抗炎[6−7]、抗菌[8−9]、抗肿瘤[10−11]、降血糖[12−14]等药理活性。此外, 肉桂被广泛地用于医疗、食品、日用品等多个领域, 具有良好的发展前景, 对肉桂的深入研究可提高其经济价值和挖掘其科学内涵。

《雷公炮炙论》[15]指出“凡使, 勿薄者, 要紫色浓者, 去上粗皮, 取心中味辛者使”, 《本草害利》[16]记载“去粗皮用, 或研末冲入药煎”, 2020 版《中国药典》(以下简称药典)规定肉桂在炮制时须除去杂质及粗皮, 可见, 自古以来便认为肉桂皮部质量不好, 使用时须除去。粗皮是指植物木栓形成层以外的落皮层部分, 一般认为去除之能够使药材纯净, 饮片质量更佳。目前, 关于肉桂刮皮问题的探讨多从有效成分出发[17−18], 而少见于对其无机元素含量的考察。关注无机元素含量对于药食两用中药材质量具有重要意义。无机元素在中药材中既包括人体必需的微量元素, 如 Co、Ni 等, 这些元素参与人体代谢活动, 是中药发挥疗效的重要物质基础; 也包括有害重金属元素, 如 Pb、Cd 等, 其含量过高可能引发不良反应。通过测定无机元素含量, 可以为中药材的质量评价和控制提供科学依据, 进而保障药食两用中药材的安全性和有效性[19]。基于此, 本研究突破传统炮制经验的主观判断框架, 运用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS), 测定肉桂不同处理组(带皮组、刮皮组、粗皮组)15 种无机元素含量, 借助单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、层次聚类(hierarchical clustering, HC)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)等化学计量学手段, 系统剖析不同处理组间无机元素的差异特征, 并筛选出特征性元素。结合药典标准及用药人群特点, 开展重金属及有害元素的风险评估, 为肉桂质量控制提供科学依据, 完善其安全用药标准, 推动肉桂产业的健康发展。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

22 批带皮的肉桂样品, 均为桂通, 经广西壮族自治区药品检验研究院黄清泉主管药师鉴定为樟科植物肉桂的干燥树皮, 样品信息见表 1。将带粗皮的肉桂(以下简称带皮), 用刀刮去粗皮的肉桂(以下简称刮皮), 刮下的粗皮(以下简称粗皮)分别编号为 DP1~22、GP1~22、CP1~22。

多元素混合标准溶液(Ag、As、Cd、Co、Cr、Cs、Cu、Ni、Pb、Rb、Se、Sr、Tl、U, 质量浓度 10 μg/mL, 24DC1957, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 汞单元素标准溶液(质量浓度 1000 μg/mL, B21070358, 坛墨质检标准物质中心); 混合内标溶液(Bi、Ge、In、Sc、Tb、Y, 质量浓度 10 μg/mL, 5183-4681, 美国安捷伦有限公司); 柑橘叶成分分析标准物质(GSB-11, 地球物理地球化学勘查研究所)。

表 1 样品信息
Table 1 Sample information

序号	产地	序号	产地
1	广西桂平	12	越南
2	广西桂平	13	广西防城
3	广东肇庆	14	云南蒙自
4	广东肇庆	15	广西容县
5	广东韶关	16	广西容县
6	广东韶关	17	广西岑溪
7	广西容县	18	广西岑溪
8	广西容县	19	广西容县
9	广西岑溪	20	云南蒙自
10	广西防城	21	广西容县
11	广西防城	22	广西容县

1.2 仪器与设备

8800 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); MARS6 型微波消解仪(美国 CEM 公司); BHW-09W 型精密控温赶酸架(上海博通化学科技有限公司); CP224S 型万分之一分析天平(瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 仪器工作参数

ICP-MS 的测定条件见表 2。

表 2 ICP-MS 工作条件
Table 2 Operating conditions of ICP-MS

条件	参数	条件	参数
IF/BK 真空度/Pa	234	射频功率/W	1547
四极杆真空度/Pa	1.48×10^{-3}	雾化气流速/(L/min)	1.08
雾化室温度/℃	2	扫描/重复次数/次	100
蠕动泵速度/(r/s)	0.1	进样针深度/mm	80

1.3.2 溶液配制

标准溶液的配制: 精密移取多元素混合标准溶液(10 μg/mL)适量, 用 5%硝酸溶液稀释至刻度, 得到质量浓度分别为 0、0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、50.0、100.0、200.0、500.0 ng/mL 的系列混合标准溶液; 精密吸取适量的汞标准溶液(1000 μg/mL)加 5%硝酸溶液稀释, 制成质量浓度分别为 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0 ng/mL 的标准溶液。

内标溶液的配制: 精密吸取混合内标溶液(10 μg/mL) 1 mL 至 50 mL 量瓶中, 加 5%硝酸稀释至刻度, 摇匀, 即得(200 ng/mL)。

供试品溶液与空白溶液的配制: 取肉桂粉末 0.5 g, 精密称定, 置微波消解罐中, 加硝酸溶液(65%) 6 mL, 放入微波消解仪进行消解, 消解完毕后, 放冷, 置于赶酸架中赶酸 10 min, 将样品转移至 50 mL 容量瓶中, 用水分次洗涤消解罐, 一并转移至 50 mL 容量瓶中, 并用水稀释至刻度, 摇匀, 即得。不加样品同法制成空白溶液。

1.3.3 风险评估

(1)每日最大可耐受摄入量

每日最大可耐受摄入量(estimated daily intake, EDI)计算见公式(1)[20]。

$$\mathrm{EDI}=\frac{C\times\mathrm{IRD}}{\mathrm{BW}} \tag{1}$$

式中: C 为肉桂药材中重金属质量分数, mg/kg; IRD 为每日摄入药材量(daily ingestion rate); BW 为人的平均体重(body weight)(参照国际通用标准成人为 55.9 kg)。药典规定肉桂用药量为 1~5 g, 此处按肉桂摄入量 5 g 计。以每日暂定可耐受摄入量(provisional tolerable daily intake, PTDI)为参照进行对比[21−24], 可以评估肉桂可能导致的健康风险水平。当 EDI<PTDI 时, 表明各处理组肉桂中重金属及有害元素对健康无显著影响。

(2)致癌风险评估

致癌风险(carcinogenic risk, CR)的量化评估是环境健康风险评价领域的关键环节。对肉桂不同处理组中各有害元素(As、Cd、Pb)的 CR 进行评估。计算见公式(2)。

$$\mathrm{CR}=\frac{C\times\mathrm{IRD}\times\mathrm{EF}\times\mathrm{ED}}{\mathrm{BW}\times\mathrm{AT}\times\mathrm{CSF}} \tag{2}$$

式中: C 为肉桂药材中有害元素的实际测定值, mg/kg; IRD 为每日摄入药材量, g; 药典规定肉桂用药量为 1~5 g, 此处肉桂摄入量按 5 g 计; EF 为每年暴露于有害元素的天数(exposure frequency), 本研究定为 30 d; ED 为暴露于有害元素的年数(exposure duration), 定为 20 年; BW 为人的平均体质量(body weight), 以国际通用标准为参考(设定成人 55.9 kg, 儿童 32.7 kg); AT 为平均接触毒物的时间(average time), 定为人均寿命 70 年×365 d; CSF 为致癌斜率因子(cancer slope factor) [As: 1.5000 mg/(kg • d)、Pb: 0.0085 mg/(kg • d)、Cd: 6.1000 mg/(kg • d)][25−29]。美国环保局指出, 当 $\mathrm{CR}<1\times10^{-6}$ 时, 该风险可忽略不计。当阈值处于 1×10^{-6}~1×10^{-4} 时, 其对人类个体造成的健康风险被认为处于可接受的范围。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016、Origin 2024、SIMCA 14.1 等软件对数据进行多元化统计分析, 其中单因素方差分析结果以平均值±标准偏差表示。所有实验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 方法学考察

2.1.1 线性关系考察

分别精密移取混合元素标准溶液及内标溶液适量, 按 1.3.1 项下进行测定, 以溶液浓度为横坐标(X, μg/L), 响应值为纵坐标(Y)绘制标准曲线, 结果(表 3)表明 Hg 元素在 0.1~2.0 μg/L, 其余 14 种元素在 0.1~500.0 μg/L 线性关系良

好, 且相关系数均大于 0.9990。

表 3　线性关系表
Table 3　Table of linear relationship

元素名称	回归方程	r	线性范围/(μg/L)
Cr	Y=1.1842E–1X+4.9172E-2	1.0000	0.1~500.0
Co	Y=2.3516E–1X+3.6322E-3	1.0000	0.1~500.0
Ni	Y=6.5471E–2X+6.1769E-3	1.0000	0.1~500.0
Cu	Y=1.8817E–1X+3.6475E-2	1.0000	0.1~500.0
As	Y=1.4388E–2X+1.5582E-4	1.0000	0.1~500.0
Se	Y=5.0726E–4X+1.3117E-4	1.0000	0.1~500.0
Rb	Y=5.1038E–3X+9.3445E-4	1.0000	0.1~500.0
Sr	Y=7.1741E–3X+4.3147E-4	1.0000	0.1~500.0
Ag	Y=3.8265E–2X+1.3463E-4	0.9999	0.1~500.0
Cd	Y=2.7259E+3X+0.0000E+0	1.0000	0.1~500.0
Cs	Y=1.5806E–2X+1.6185E-4	0.9999	0.1~500.0
Hg	Y=0.0026X+0.95576E-6	0.9990	0.1~2.0
Tl	Y=2.2832E+4X+2.6697E+1	1.0000	0.1~500.0
Pb	Y=2.8333E–2X+6.8142E-4	1.0000	0.1~500.0
U	Y=3.1141E–2X+6.4122E-6	1.0000	0.1~500.0

2.1.2　精密度、重复性、加样回收实验

取同一供试品溶液, 连续进样 6 次, 计算得到 15 种无机元素响应值的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)均在 2.6%~4.5%, 表明仪器精密度良好; 按 1.3.2 项下方法平行制备 6 份供试品溶液, 进样测得各元素响应值的 RSD 在 1.2%~4.9%, 表明该方法重复性良好; 精密称取已知含量肉桂粉末 6 份, 加入与样品中各元素含量相当的混合标准溶液, 计算得到各元素的平均加样回收率为 93.1%~106.5%, 回收率 RSDs 为 1.0%~3.8%, 表明该方法准确度良好。

2.1.3　准确性实验

取国家标准物质柑橘叶按 1.3.2 项下制备标准物质溶液, 进样分析, 结果所测元素的测定值均在标准值范围内, 表明仪器和方法的准确性良好。

2.2　样品含量测定结果

取 3 个不同处理组的肉桂样品, 按上述实验方法进行测定, 计算各样品中 15 种元素的含量, 结果见表 4。根据药典收录的关于药材及饮片(植物类)重金属及有害元素的标准, 带皮与刮皮肉桂样品中 Pb、Cu、As、Cd 的含量均在范围内, 但粗皮中 Pb 远超药典中规定的 5.0 mg/kg, 其他药典限量元素在粗皮中鲜见超标情况。

2.3　不同处理的肉桂无机元素含量的单因素方差分析结果

单因素方差分析通过比较组间方差和组内方差来判断各组均值是否相等, 进而判断 3 个或更多独立样本的均值是否存在显著差异。单因素方差分析需同时满足各样本组观察值相互独立, 且服从正态分布, 各样本组内观察值总体方差相等, 即方差齐性。当样本不服从正态分布时, 选用非参数检验 Kruskal-Wallis 方差分析, 事后多重比较选择 Dunn 检验; 当数据满足正态分布但不满足方差齐性时, 选用 Welch 法近似 t 检验, 两两比较选择 Games Howell 法; 当样本同时满足正态分布与方差齐性时, 选择单因素方差分析, 均值比较选择 Fisher 检验, P<0.05 为差异具有统计学意义。将上述数据导入 Origin 2024 软件进统计分析, 正态性检验和方差齐性检验结果见附件, 方差分析结果见表 4。结果发现 Tl、Cs、Cd 这 3 个元素在 3 组处理组之间无显著差异, Rb、Sr 这 2 个元素粗皮组含量均较低且均与另外两组差异显著, 其他 10 个元素粗皮组含量均较高且均与另外两组存在显著差异, 其中, As、Ag 这 2 个元素分别在 3 个处理组之间两两存在显著差异, 提示粗皮对于这 10 个无机元素具有较强的富集作用。

为了更直观地观察肉桂这 15 种元素含量在不同处理组之间的差异, 将元素含量导入 Origin 2024 软件绘制多因子箱型图, 见图 1。图 1 中可明显看出这 15 个元素中, Rb、Sr 元素的含量较高。综合来看, 粗皮的无机元素含量显著高于带皮和刮皮组, 符合传统观念中肉桂在使用前需刮去粗皮的做法。

表 4　15 种无机元素单因素方差分析结果(mg/kg)
Table 4　Results of One-Way ANOVA for 15 kinds of inorganic elements (mg/kg)

元素	带皮	刮皮	粗皮
Cr	0.327±0.239^{b}	0.271±0.166^{b}	1.457±0.755^{a}
Co	0.099±0.102^{b}	0.112±0.165^{b}	0.243±0.144^{a}
Ni	0.245±0.230^{b}	0.227±0.225^{b}	1.297±0.955^{a}
Cu	3.306±0.946^{b}	2.815±0.611^{c}	18.177±4.515^{a}
As	0.038±0.037^{b}	0.017±0.011^{c}	0.741±0.520^{a}
Se	0.047±0.036^{b}	0.039±0.029^{b}	0.696±0.398^{a}
Rb	31.748±13.059^{a}	32.820±14.529^{a}	17.216±9.390^{b}
Sr	41.963±27.339^{a}	45.156±27.872^{a}	13.004±6.128^{b}
Ag	0.003±0.004^{b}	0.001±0.001^{c}	0.025±0.020^{a}
Cd	0.447±0.177^{a}	0.451±0.154^{a}	0.550±0.255^{a}
Cs	0.188±0.155^{a}	0.196±0.164^{a}	0.354±0.290^{a}
Hg	0.006±0.004^{b}	0.004±0.003^{c}	0.131±0.064^{a}
Tl	0.038±0.036^{a}	0.045±0.062^{a}	0.045±0.027^{a}
Pb	0.826±0.806^{b}	0.365±0.580^{c}	18.253±17.806^{a}
U	0.004±0.003^{b}	0.001±0.001^{b}	0.079±0.074^{a}

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.4　主成分分析结果

将肉桂 15 种无机元素指标测定结果分别导入统计软件中, 进行 PCA。通过降维的方式, 将 15 种无机元素的复杂数据转化为少数几个综合指标(主成分), 以揭示不同处

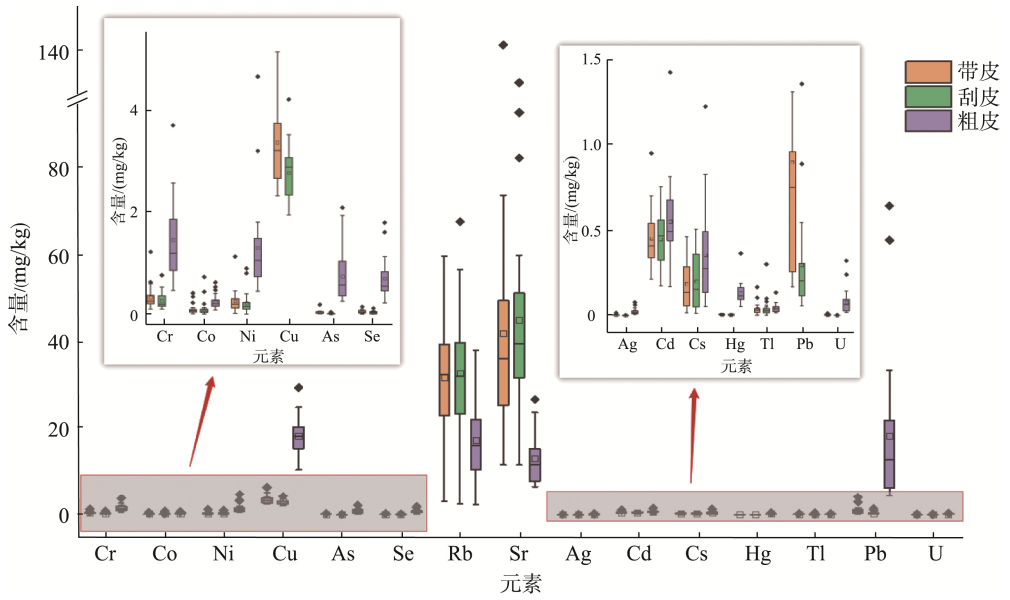


图 1 15 种无机元素在不同处理组的含量分布

Fig.1 Content distribution of 15 kinds of inorganic elements with different processing treatments

理组肉桂样品中无机元素的整体分布特征和主要差异来源。以特征值 λ>1 为原则，从 15 种无机元素中提取了 3 个主成分，累计方差贡献率为 74.370%，表明这 3 个主成分可解释原始数据 74.370%的信息，能较好地反映不同处理组肉桂的无机元素特征。其中，主成分 1 的方差贡献率最大，达到了 54.389%，是解释数据差异的主要成分(表 5)。因子载荷绝对值越大，表明该元素对相应主成分的影响越大，一般载荷值的绝对值大于 0.8 时认为该主成分对应的因素与

表 5 初始特征值及累计贡献率

Table 5 Initial eigenvalues and cumulative contribution rates of inorganic elements

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	λ	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	λ	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	8.158	54.389	54.389	8.158	54.389	54.389
2	1.766	11.775	66.164	1.766	11.775	66.164
3	1.231	8.206	74.370	1.231	8.206	74.370

该成分具有相关关系。由表 6 可知，Se、Cr、As、Cu、Ag、U、Ni、Pb 等元素载荷较高，说明这些元素是第 1 主成分的主要贡献者，且均为粗皮组含量显著高于带皮和刮皮组的元素，提示第 1 主成分主要反映粗皮组与其他两组在这些元素上的差异；Rb、Tl 在主成分 2 上有较高的载荷，Cd 在主成分 3 中载荷最高。

利用 Origin 2024 绘制 PCA 得分图，由结果(图 2)可直观观察到粗皮组明显与其他两组区分开，而带皮组与刮皮组存在明显交叉。

2.5 层次聚类结果

为了验证在 PCA 中刮皮组与带皮组的同源性，将数据导入 Origin 2024 进行层次聚类，聚类方法选择平均，距离类型选择 Euclidean，以 Z 分数将数据进行标准化，找聚类中心点依据选择距离总和，结果见图 3。结果表明当聚类距离为 4 时，样本大致分为两类，带皮组与刮皮组聚为一类，而粗皮组单独聚为一类，与 PCA 的结果基本一致。另外，DP21、GP21、CP1、CP16、CP20、CP7、CP19、CP9 未能聚在这两个类别中，推测由样品差异引起。

表 6 因子载荷阵

Table 6 Factor loading matrix

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Se	0.953	–0.072	0.044
Cr	0.941	0.160	–0.063
As	0.938	0.045	0.078
Cu	0.901	–0.153	–0.065
Ag	0.858	–0.140	0.310
U	0.839	0.070	–0.280
Ni	0.810	0.296	–0.072
Pb	0.805	–0.063	0.318
Hg	0.784	–0.248	–0.365
Cs	0.599	0.486	0.023
Co	0.587	0.282	–0.053
Sr	–0.512	0.153	0.327
Rb	–0.410	0.798	0.183
Tl	0.120	0.732	–0.088
Cd	0.410	–0.142	0.805

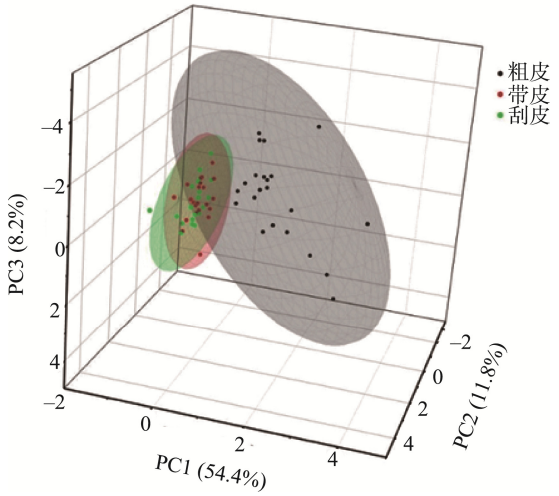


图 2　PCA 结果图
Fig.2　Results plots of PCA

2.6　正交偏最小二乘法-判别分析结果

OPLS-DA 模型主要是以数据变量重要性作为依据来筛选差异代谢产物，能够把握数据的整体特征及变异规律。为了进一步探寻肉桂不同加工品产生差异性的主要标志物，将肉桂样品的 15 种无机元素数据导入 SIMCA 14.1 软件，进行有监督的 OPLS-DA 模式识别分析。当样品分为粗皮、带皮和刮皮 3 组时，所建立的模型较差，但从 PCA 和 HC 中可明显看出带皮和刮皮肉桂聚在一起，因此将带皮和刮皮肉桂归于一组代入分析。从理论上来说，R^2 和 Q^2 越接近 1.0，则说明模型的拟合效果越好，通常来说 R^2 和 Q^2 高于 0.5 即代表比较好。根据图 4A，模型提取潜变量(1+3+0)个，自变量拟合指数(R^2X)、因变量拟合指数(R^2Y)和模型预测指数(Q^2)分别为 0.981、0.894、0.874，说明该模型的解释能力尚可。将模型进行 200 次的置换，结果见图 4B。拟合直线 Y 轴截距 R^2Y 和 Q^2Y 分别为 0.0149, –0.242<0,并且左侧的置换后的 R^2 和 Q^2 均低于右侧的原始 R^2 和 Q^2，表明该模型没有出现过拟合现象而造成假阳结果。肉桂外皮能够较好地和带皮肉桂及刮皮肉桂区分，带皮肉桂与刮皮肉桂区分不明显可能是刮下的粗皮占药材的量过少导致的。根据模型中变量权重重要性 VIP 预测值(图 4C),

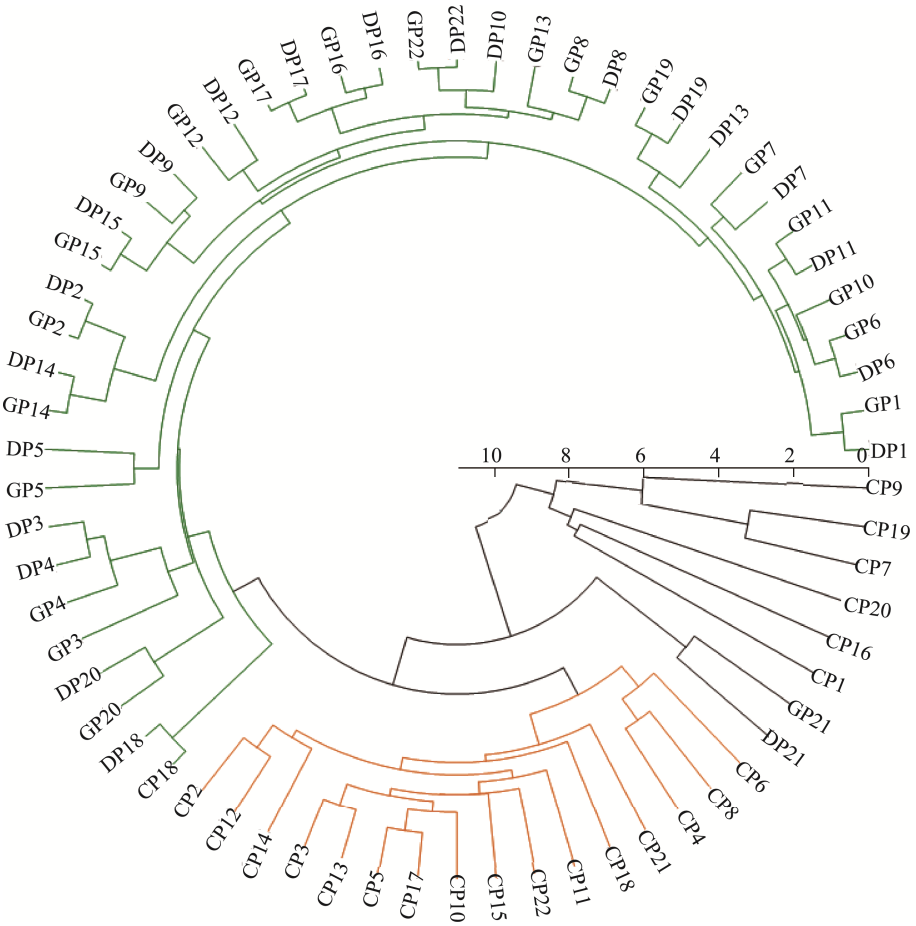


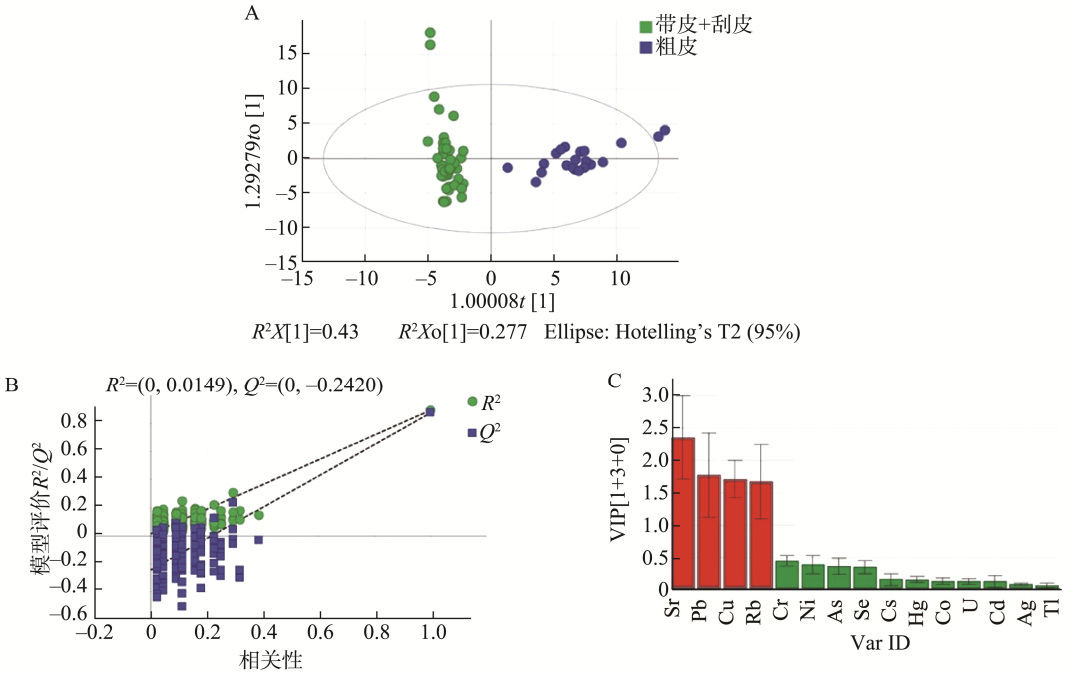
图 3　层次聚类结果
Fig.3　Results of hierarchical clustering

以 VIP>1 为原则，选出 Sr、Pb、Cu、Rb 4 个元素作为肉桂粗皮与带皮和刮皮肉桂的差异性元素。

2.7 重金属及有害元素风险评估结果

2.7.1 含量结果分析

按照药典中肉桂药用标准，肉桂粗皮组的重金属及有害元素不合格情况较为突出，尤其是 Pb 的不合格率最高，达到了 90.9%，而带皮组和刮皮组的重金属及有害元素均符合药典标准，表明去除粗皮可显著降低肉桂中重金属及有害元素超标的风险(表 7)。为更好地完善肉桂质量控制，需要综合考虑肉桂药材自身对无机元素的积累特性、用药人群及每日允许摄入量等各方面影响因素，开展中药重金属及有害元素的风险评估。



注: A. OPLS-DA 模型得分图; B. OPLS-DA 模型置换检验图; C. OPLS-DA 变量重要性投影(variable importance projection, VIP)值图。

图 4 OPLS-DA 结果图

Fig.4 Results plots of OPLS-DA

表 7 重金属及有害元素的合格统计情况

Table 7 Qualified statistics of heavy metals and harmful elements

元素	药典限量标准/(mg/kg)	粗皮组		带皮组		刮皮组	
		不合格样本量	不合格率/%	不合格样本量	不合格率/%	不合格样本量	不合格率/%
As	2	1	4.55	0	0	0	0
Cu	20	6	27.30	0	0	0	0
Cd	1	1	4.55	0	0	0	0
Hg	0.2	0	0	0	0	0	0
Pb	5	20	90.90	0	0	0	0

2.7.2 每日最大可耐受摄入量结果

EDI 计算结果见表 8。无论带皮组、刮皮组还是粗皮组，肉桂中重金属及有害元素的每日摄入量均处于安全水平，但粗皮组的风险相对较高，表明刮皮处理可进一步降低部分元素的摄入风险。

2.7.3 致癌风险评估结果

对肉桂不同处理组所含 Cd、As、和 Pb 元素的 CR 进行评估，可知 Cd、As、Pb 的 CR 值数量级均小于阈值 1×10^{-6}(表 9)，表明肉桂以 5 g 摄入量 20 年内每年 30 d 摄入时，Pb、Cd 和 As 对成人及儿童造成的 CR 均极低，可以忽略不计。

表 8 重金属及有害元素的 EDI

Table 8 EDI values of heavy metals and harmful elements

元素	EDI×10⁻⁵/[mg/(kg·d)]			PDTI×10⁻⁵/[mg/(kg·d)]
	带皮组	刮皮组	粗皮组	
As	0.340	0.152	6.628	214
Cu	29.571	2.815	162.585	50000
Cd	3.998	4.034	4.919	83
Hg	0.054	0.036	1.172	/
Pb	7.388	3.265	163.265	357

注: /表示 PDTI 不规定 Hg。

表 9　肉桂中重金属及有害元素 CR 值(×10^{-9})
Table 9　CR values of heavy metals and harmful elements in *Cinnamomum cassia* Presl (×10^{-9})

元素	带皮组		刮皮组		粗皮组	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	0.05	0.09	0.02	0.04	1.04	1.77
Pb	1.16	1.98	0.51	0.87	25.56	43.69
Cd	0.63	1.07	0.63	1.08	0.77	1.32

3　结论与讨论

3.1　讨　论

本研究运用 ICP-MS 对肉桂不同处理组的 15 种无机元素含量进行测定并进行单因素方差分析, 结果表明粗皮组对 Cr、Co、Ni、Cu、As、Se、Rb、Sr、Ag、Hg、Pb、U 等 12 种元素存在显著富集作用, 其中 Pb 含量远超药典标准(不合格率达 90.9%), 而带皮组与刮皮组的元素含量整体较低且符合药典要求。这可能与粗皮直接暴露于外界环境, 且其组织结构特点利于元素吸附、沉积有关[30]。主成分分析显示, 3 个主成分累计方差贡献率达 74.370%, 其中 PC1(方差贡献率 54.389%)主要由粗皮组高富集的 Se、Cr、As 等元素贡献, 使得粗皮组与带皮组、刮皮组在得分图中明显分离; OPLS-DA 模型 R^2X=0.981、R^2Y=0.894、Q^2=0.874, 稳定性良好, 筛选出 Sr、Pb、Cu、Rb 为区分粗皮与其他两组的特征元素。而在单因素方差分析中, 这 4 个元素的粗皮组均与另外两组差异显著, 进一步验证了特征元素的统计学意义。健康风险评估表明, 所有处理组的 EDI 均低于暂定 PTDI, CR 值均远小于 1×10^{-6} 阈值, 但粗皮组风险相对较高, 且儿童 CR 值普遍高于成人。本研究中带皮组与刮皮组难以区分, 推测为刮下的粗皮量占肉桂总量的比例过少, 粗皮对 Pb、Cu 等元素的极端富集效应使得化学计量学模型更易识别粗皮组与其他两组的差异, 而带皮组与刮皮组因元素含量处于同一数量级, 在得分图中呈现交叉重叠。基于以上结果可知肉桂在炮制时刮去粗皮及杂质的做法具有一定科学依据, 而这也与相关研究的结果相佐, 除去粗皮及杂质后可提高肉桂有效成分的含量[18], 中药材皮部常为无机元素累积的主要部位[31], 这与本研究观察到的肉桂粗皮无机元素富集特征一致。

3.2　结　论

肉桂是我国传统的药食两用的大宗药材[32], 其质量和安全性直接关系到消费者的健康。现代肉桂刮皮的观点大多被认可, 历代对于肉桂刮皮问题均有记载。若不除去肉桂粗皮, 调剂时或可影响用药的准确性及安全性。关于刮皮问题的现代研究尚缺乏系统性, 大多研究仅着手于化学成分、药效学评价中的一或两部分内容[33]。本研究通过 ICP-MS 测定了不同处理的肉桂样品中 15 种无机元素的含量, 并对其进行差异性分析及重金属及有害元素风险评估, 证实肉桂炮制过程中去除粗皮可显著降低重金属暴露风险, 为“去粗皮”的传统炮制方法提供了科学依据, 所建立的分析方法及筛选的特征元素可为肉桂的质量控制与安全性评价提供参考。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 2020 年版一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China. Part I [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.

[2] 徐冉, 王志家, 林晓钰, 等. 煎煮方式对肉桂-黄连药对超分子的物质相态和生物活性的影响[J/OL]. 中国中药杂志, 1-12. [2025-10-26]. https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20250925.301
XU R, WANG ZJ, LIN XY, *et al*. Effects of decoction methods on the supramolecular state and biological activity of the *Cinnamon-coptis*herb pair [J/OL]. China Journal of Chinese Materia Medica, 1-12 [2025-10-26]. https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20250925.301

[3] 卓韦杰, 廖思明, 陈锦霞, 等. 基于 GC-MS/MS 技术对经典名方小续命汤不同萃取溶剂中挥发性成分的差异分析[J]. 中草药, 2025, 56(15): 5359–5369.
ZHUO WJ, LIAO SM, CHEN JX, *et al*. Analysis of differences in volatile components in different extraction solvents of the classic formula Xiao Xuming Tang based on GC-MS/MS technology [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2025, 56(15): 5359–5369.

[4] 丁富娟, 张静, 苑艳飞, 等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学计量学和一测多评法的肉桂叶质量评价研究[J]. 药物分析杂志, 2025, 45(6): 996–1004.
DING FJ, ZHANG J, YUAN YF, *et al*. Quality evaluation of *Cinnamon*leaf based on HPLC fingerprint combined with chemometrics and multi-evaluation by single measurement [J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2025, 45(6): 996–1004.

[5] LIU S, YANG L, ZHENG S, *et al*. A review: The botany, ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology of *Cinnamomi cortex* [J]. RSC Advances, 2021, 11(44): 27461–27497.

[6] 陈晓慧. 肉桂醛缓解金黄色葡萄球菌诱导乳腺炎症反应的作用机制研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2025.
CHEN XH. Mechanism of action of cinnamaldehyde in alleviating *Staphylococcus aureus*-induced mastitis [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025.

[7] 周嘉浩, 丁子涵, 宋培荣, 等. 桂皮醛的抗炎作用及其作用机制研究进展 [J/OL]. 中药药理与临床, 1-23. [2025-10-26]. https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyl.20250929.009
ZHOU JH, DING ZH, SONG PR, *et al*. Advances in the anti-inflammatory effects and mechanisms of action of cinnamaldehyde [J/OL]. Chinese Pharmacological Bulletin, 1-23. [2025-10-26]. https://doi.org/10.13412/ j.cnki.zyyl.20250929.009

[8] ÖZEL Y, ÇAVUŞ İ, ÜNLÜ G, *et al*. Investigation of the antitrichomonal activity of cinnamaldehyde, carvacrol and thymol and synergy with metronidazole [J]. Turkiye Parazitol Derg, 2024, 48(2): 72–76.

[9] GALLO C, GIRÓN-HERNÁNDEZ J, HONEY DA, *et al*. Synergistic nanocoating with layer-by-layer functionalized PCL membranes enhanced by manuka honey and essential oils for advanced wound healing [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 20715.

[10] RAJAGOPAL A, RAJAKANNU S. *Cassia auriculata* linn. extracts induce apoptosis and cell cycle arrest of A549 lung cancer cell lines: An *in vitro* approach [J]. South African Journal of Botany, 2022, 147: 275–285.

[11] AMINZADEH Z, ZIAMAJIDI N, ABBASALIPOURKABIR R, *et al*. Antitumor activities of aqueous cinnamon extract on 5637 cell line of

bladder cancer through glycolytic pathway [J]. International Journal of Inflammation, 2022, 2022: 3855368.

[12] 张思涵, 王婷婷, 赵志芬, 等. 基于四气理论的中药单体对化疗致骨髓抑制的作用机制研究[J]. 中国药房, 2025, 36(18): 2341–2347.
ZHANG SH, WANG TT, ZHAO ZF, *et al*. Mechanisms of action of traditional chinese medicine monomers based on the theory of four qi in alleviating chemotherapy-induced myelosuppression [J]. China Pharmacy, 2025, 36(18): 2341–2347.

[13] 张慧慧, 李灿, 刘会平, 等. 肉桂多糖的提取纯化及体外抗氧化和降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 15–24.
ZHANG HH, LI C, LIU HP, *et al*. Extraction, purification, and *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activity analysis of *Cinnamon* polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 15–24.

[14] 顾嘉琪, 覃骊兰, 苏榕, 等. 肉桂对糖尿病大鼠肠促胰素效应的调节作用[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(12): 104–111.
GU JQ, QIN LL, SU R, *et al*. Modulatory effects of *Cinnamon* on the incretin effect in diabetic rats [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2023, 29(12): 104–111.

[15] 雷公. 雷公炮炙论[M]. 芜湖: 皖南医学院科研科, 1983.
LEI G. Leigong Paozhi Lun [M]. Wuhu: Research Department of Wannan Medical College, 1983.

[16] 凌奂. 本草害利[M]. 北京: 中医古籍出版社, 1982.
LING H. Bencao Haili [M]. Beijing: Ancient Chinese Medical Books Publishing House, 1982.

[17] 刁元元, 邱智东, 张欣舒, 等. 肉桂 HPLC 指纹图谱与颜色相关性及化学模式识别分析[J]. 时珍国医国药, 2021, 32(11): 2676–2680.
DIAO YY, QIU ZD, ZHANG XS, *et al*. Correlation analysis of *Cinnamon* HPLC fingerprint and color and chemical pattern recognition [J]. Shizhen Medicine and Materia Medica Research, 2021, 32(11): 2676–2680.

[18] 梅菊, 吴涛, 李强, 等. 不同产地肉桂质量及炮制过程成分变化研究[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(3): 377–387, 399.
MEI J, WU T, LI Q, *et al*. Study on the quality and component changes during processing of *Cinnamon* from different origins [J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(3): 377–387, 399.

[19] 赵立春. 元素中药: 元素与中药功效的关联研究[J]. 微量元素与健康研究, 2025, 42(5): 31–35.
ZHAO LC. Elemental chinese medicine: Research on the correlation between elements and the efficacy of Chinese medicine [J]. Research on Trace Elements and Health, 2025, 42(5): 31–35.

[20] 江虹, 何世昊, 高帅杰, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定两色金鸡菊中 18 种元素及其安全性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(21): 230–238.
JIANG H, HE SH, GAO SJ, *et al*. Determination of 18 elements in coreopsis tinctoria by inductively coupled plasma mass spectrometry and safety evaluation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(21): 230–238

[21] 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 HT, JI AIX, *et al*. Determination of inorganic element content in pine pollen and safety and health risk assessment by ICP-MS [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(1): 67–76.

[22] 柳志诚, 苏知君, 余少君, 等. 基于 ICP-MS 结合化学计量学的不同批次熊胆粉中无机元素差异分析及健康风险评估[J]. 中国现代中药, 2025, 27(9): 1723–1729.
LIU ZC, SU ZJ, YU SJ, *et al*. Analysis of inorganic element differences in different batches of bear bile powder and health risk assessment based on ICP-MS and chemometrics [J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(9): 1723–1729.

[23] 王思阳, 罗恒真, 肖邦意, 等. 基于电感耦合等离子体质谱法的桦树皮药材中 5 种重金属元素的定量分析与风险评估[J]. 理化检验-化学分册, 2025, 61(10): 1208–1215.
WANG SY, LUO HZ, XIAO BY, *et al*. Quantitative analysis and risk assessment of five heavy metal elements in birch bark herbs based on inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chemical Reagents, 2025, 61(10): 1208–1215.

[24] 马鹏程, 梁卜文, 申国华, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地构树叶 22 种无机元素及健康风险评估[J]. 中国药学杂志, 2025, 60(3): 234–243.
MA PC, LIANG BW, SHEN GH, *et al*. Determination of 22 Inorganic elements in *Broussonetia*leaves from different origins and health risk assessment by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2025, 60(3): 234–243.

[25] 黎晓晶, 刘浩, 郭海涛, 等. ICP-MS 测定铁棒锤炮制前后无机元素含量及健康风险评估[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(3): 606–615.
LI XJ, LIU H, GUO HT, *et al*. Determination of inorganic element content and health risk assessment before and after processing of iron club by ICP-MS [J]. Chemical Research and Application, 2025, 37(3): 606–615.

[26] 解淑雅, 汪星辰, 罗亚春, 等. 基于 ICP-MS/MS 对蕨麻中的微量元素含量测定与健康风险评估[J]. 西藏科技, 2025, 47(3): 25–32.
XIE SY, WANG XC, LUO YC, *et al*. Determination of trace element content in potentilla anserina and health risk assessment based on ICP-MS/MS [J]. Tibet Science and Technology, 2025, 47(3): 25–32.

[27] 阎睿, 熊雪庆, 朱德文, 等. 三峡库区道地药材木香中 29 种无机元素的测定与健康风险评估[J]. 中国野生植物资源, 2025, 44(1): 52–59.
YAN R, XIONG XQ, ZHU DW, *et al*. Determination of 29 inorganic elements in *Aucklandia* from the three gorges reservoir area and health risk assessment [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2025, 44(1): 52–59.

[28] 马庆博, 石晶, 朱旭江, 等. 基于半夏无机元素含量分析的产地区分及健康风险评估[J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(6): 51–59, 84.
MA QB, SHI J, ZHU XJ, *et al*. Discrimination of origins of pinellia ternata based on Inorganic element content analysis and health risk assessment [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(6): 51–59, 84.

[29] 王波, 王彩虹, 祁光增, 等. 不同生长时期大黄中无机元素的测定及健康风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(11): 1498–1505.
WANG B, WANG CH, QI GZ, *et al*. Determination of inorganic elements in rheum palmatum at different growth stages and sealth risk assessment [J]. Chinese Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(11): 1498–1505.

[30] 郑汉臣, 胡芳弟. 药用植物学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
ZHENG HC, HU FD. Pharmacognosy [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020.

[31] 杨俊杰, 张艳玲, 王峥涛, 等. 土茯苓产地加工过程中去皮的合理性分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(3): 1–5.
YANG JJ, ZHANG YL, WANG ZT, *et al*. Rationality analysis of bark in the processing of smilax glabra at its place of origin [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2017, 23(3): 1–5.

[32] 罗纯, 庄培钧, 郭家庚, 等. 基于 VOSviewer 和 CiteSpace 药食同源中药肉桂研究进展知识图谱可视化分析[J]. 中草药, 2024, 55(16): 5596–5608.
LUO C, ZHUANG PJ, GUO JG, *et al*. Visualization analysis of research progress on *Cinnamon*, a medicinal and edible Chinese medicine, based on VOSviewer and CiteSpace [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(16): 5596–5608.

[33] 吴玟萱, 刘勇, 何元松, 等. 中国药典中有关中药刮皮问题的现状[J]. 河南中医, 2016, 36(11): 2043–2046.
WU WX, LIU Y, HE YS, *et al*. Current status of the scraping issue of traditional chinese medicine in the Chinese pharmacopoeia [J]. Henan Traditional Chinese Medicine, 2016, 36(11): 2043–2046.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)