DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260116005
引用格式: 杨飞, 阿不力孜·艾力, 张玥, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定库尔勒香梨及秋梨润肺膏中微量元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 102–110.
Yang Fei, Abulizi Aili, Zhang Yue, et al. Determination of trace elements in *Pyrus sinkiangensis* Yu and Qiuli lung moistening paste by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 102–110. (in Chinese with English abstract).

电感耦合等离子体质谱法测定库尔勒香梨及秋梨润肺膏中微量元素

杨　飞[1,2#], 阿不力孜·艾力[2,3#], 张　玥[2,3], 曹天洋[4], 于　敬[1], 海力茜·陶尔大洪[1*]

(1. 新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心, 乌鲁木齐　830011; 2. 新疆医科大学药学院, 乌鲁木齐　830017; 3. 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室, 乌鲁木齐　830011; 4. 新疆医科大学中医学院, 乌鲁木齐　830017)

摘　要: 目的　建立压力罐消解、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)同时测定库尔勒香梨及秋梨润肺膏中微量元素含量的方法。**方法**　通过压力罐消解于 80 ℃恒温 2 h、120 ℃恒温 2 h、165 ℃恒温 4 h 消解处理样品, ICP-MS 检测, 采用试验方法学考察来确定方法的准确性与可靠性。**结果**　根据试验方法学考察, 结果各元素在一定范围内线性关系均良好(r>0.9996); 精密度相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)为 0.03%~8.32%, 仪器精密度良好; 重复性 RSDs 为 0.03%~3.17%, 重复性良好。库尔勒香梨与秋梨润肺膏共含铍、硼、钛、钒、铬、锰、钴、镍、铜、锌、镓、砷、锶、镉、钡、铅等 16 种微量元素, 库尔勒香梨比秋梨润肺膏多含锂元素; 以库尔勒香梨为原料的秋梨润肺膏中钛、钒、铬、锰、钴、镍、锌、镉等 8 种元素含量比主原料库尔勒香梨高。**结论**　本方法样品需求量少、检出限低、灵敏度和准确度高, 可用于库尔勒香梨等食品中多种元素的同时测定及营养成分分析。

关键词: 库尔勒香梨; 电感耦合等离子体质谱法; 微量元素
中图分类号: TS207.3　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0102–09

Determination of trace elements in *Pyrus sinkiangensis* Yu and Qiuli lung moistening paste by inductively coupled plasma mass spectrometry

YANG Fei[1,2#] ABULIZI Ai-Li[2,3#], ZHANG Yue[2,3], CAO Tian-Yang[4], YU Jing[1], HAILIQIAN Tao-Er-Da-Hong[1*]

(1. *Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Resource Sharing Service Center*, *Urumqi* 830011, *China*; 2. *College of Pharmacy*, *Xinjiang Medical University*, *Urumqi* 830017, *China*; 3. *Key Laboratory of Nutrition and Safety Detection for Xinjiang Characteristic Functional Foods*, *Urumqi* 830011, *China*; 4. *College of Traditional Chinese Medicine*, *Xinjiang Medical University*, *Urumqi* 830017, *China*)

收稿日期: 2026-01-16
基金项目: 2024 年自治区重点研发项目(2024B04011); 2024 年乌鲁木齐市红山创新人才-青年拔尖人才项目(B241013008); 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室项目
#杨飞和阿不力孜·艾力为共同第一作者
第一作者: 杨飞(1981—), 男, 研究员, 主要研究方向为天然药物分析研究。E-mail: 279533257 @qq.com
阿不力孜·艾力(1983—), 男, 高级实验师, 主要研究方向为天然药物分析研究。E-mail: 1441318997@qq.com
***通信作者:** 海力茜·陶尔大洪(1963—), 女, 教授, 主要研究方向为天然药物研究与开发。E-mail: haiiqian247l@sina.com

ABSTRACT: Objective　To establish a method for the simultaneous determination of trace elements in *Pyrus sinkiangensis* Yu and Qiuli lung moistening paste by pressure tank digestion and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). **Methods**　The samples were digested in a pressure tank at 80 ℃ for 2 h, 120 ℃ for 2 h and 165 ℃ for 4 h, and then analyzed by ICP-MS. The accuracy and reliability of the method were evaluated through methodological studies. **Results**　The linear relationship of each element was good within a certain range (r>0.9996) based on the results of the methodological studies. The relative standard deviations (RSDs) of precision were 0.03% to 8.32%, indicating good instrument precision. The RSDs of repeatability were 0.03% to 3.17%, indicating good repeatability. Both *Pyrus sinkiangensis* Yu and Qiuli lung moistening paste contained 16 kinds of trace elements including beryllium, boron, titanium, vanadium, chromium, manganese, cobalt, nickel, copper, zinc, gallium, arsenic, strontium, cadmium, barium and lead. *Pyrus sinkiangensis* Yu contained more lithium than Qiuli lung moistening paste. The content of 8 kinds of elements including titanium, vanadium, chromium, manganese, cobalt, nickel, zinc and cadmium in Qiuli lung moistening paste made from *Pyrus sinkiangensis* Yu was higher than those in the main raw material. **Conclusion**　This method requires a small sample size, has a low limit of detection, high sensitivity and accuracy, and can be used for the simultaneous determination of multiple *Pyrus sinkiangensis* Yu.

KEY WORDS: *Pyrus sinkiangensis* Yu; inductively coupled plasma mass spectrometry; trace elements

0　引　言

库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yu)属蔷薇科、梨亚科、梨属中的新疆梨种, 具有 1400 多年的栽培历史[1–3], 其肉质细腻, 多汁味甜, 果实含浓郁的香味, 富含水分、氨基酸、维生素、多种矿物质元素, 属于医食两用水果[4–5]。库尔勒香梨中富含多糖、黄酮类、酚类、三萜类、甾体类等生物活性成分[6–7], 研究表明, 具有抑制咳嗽、缓解炎症、氧化应激防护、抗菌、抗肿瘤、免疫调节等多重功效[8–10]。

梨膏是以梨为主要原料的传统药食同源制剂, 是广大消费者认知中的健康、天然、绿色食品[11–12]。其生产工艺主要包括选择原料、清洗、切片、浸渍、熬制、浓缩、罐装和灭菌等步骤[13–14]。秋梨润肺膏以库尔勒香梨为主要原料, 百合、麦冬、贝母、款冬花及蜂蜜、冰糖等制备而成, 多种原料相协调使梨膏产品功效增加, 增添口味, 具有润肺止咳、生津利咽等功效[15–16]。

微量元素是人体必需的一类无机物质, 是构成人体组织和维持正常生理功能所必需的各种元素的总称, 根据其在人体中含量的不同, 分为常量元素和微量元素[17–18]。研究表明, 库尔勒香梨含有钾(K)、镁(Mg)、钙(Ca)、磷(P)、硅(Si)等矿质元素, 以及锰(Mn)、钠(Na)、硼(B)、铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、钼(Mo)、硒(Se)等微量元素[19–20]。其中 Fe 是含量最高的人体必需微量元素, 是骨髓制造红细胞的原料, 运输氧气和二氧化碳; Zn 可以提高人体免疫力, 加速伤口愈合, 在呼吸道感染性疾病中起着预防作用; Cu 对血红蛋白的合成起催化作用, 可辅助造血; Se 是机体多种酶的活性中心; Mo 在机体参与许多重要的生化反应, 与蛋白质结合; Mg 能维持心肌的正常功能等[21–22]。微量元素在人体内的稳态失衡, 无论是缺乏还是过量, 均会对机体健康产生不良影响。研究证实, 微量元素的缺乏可能会诱发心肌病变、血压升高、生长发育迟缓、贫血等多种病理状态[23–24]。各类矿质元素参与维持机体正常生命活动, 通过膳食途径调控微量元素摄入水平, 是保障机体生理功能正常运转、维持内环境稳态的重要基础。

目前, 食品中微量元素检测方法主要有比色法、原子吸收光谱法、荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)、电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma optical emission spectrometer, ICP-OES)和 X 射线荧光光谱法[25–28]。其中, ICP-MS 具有灵敏度高、精密度好、样品需求量小, 可同时测定多种元素、应用范围等广泛优势[29–30]。但国内外基于 ICP-MS 开展库尔勒香梨及其制品全谱微量元素的系统测定研究仍较为有限, 现有报道多以常规矿质元素分析为主, 对痕量微量元素的精准定量及加工过程元素迁移规律的研究相对匮乏。因此, 建立并优化 ICP-MS 用于库尔勒香梨及秋梨润肺膏中微量元素的同步测定, 具有重要研究必要性。本研究通过 ICP-MS 测定库尔勒香梨及秋梨润肺膏中微量元素, 为梨及其制品质量评价、营养研究与工艺优化提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

库尔勒香梨购自乌鲁木齐金桥满意商贸有限公司, 经新疆医科大学生药学教研室丛媛媛教授鉴定为库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yu), 鲜果经过洗净, 沥干, 取可食部分匀浆; Z65020126 秋梨润肺膏(库尔勒龙之源药业有限责任公司)。

硝酸(超纯级, 默克化工技术有限公司); 多元素混合对照品(GSB 04-1767-2004)、铑(Rh)单元素标准溶液(GSB

04-1746-2004)(质量浓度 100 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 水为实验室自制一级水、二级水。

1.2 仪器与设备

SD02 型匀浆机(广东德玛仕智能厨房设备有限公司); 2011F145-11 型电子天平[精度 0.01 mg, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; 25 mL 聚四氟乙烯消解内罐、25 mL 消解外罐(北京霍桐实验仪器有限公司); EH20A Plus 型微控数显电热板(北京莱伯泰科仪器有限公司); DHG9246A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司)。

1.3 方 法

1.3.1 试样消解

将配有聚四氟乙烯消解内罐用自来水、二级水冲洗, 装满 2%硝酸在 150 ℃电热板上加热 30 min; 后用二级水冲洗, 装满二级水在 150 ℃电热板加热 1 h; 最后倒掉二级水, 将消解内罐在 150 ℃电热板上加热 40 min。

称取库尔勒香梨 2 g、秋梨润肺膏 1 g(精确至 0.001 g)于消解内罐中, 各精密滴加 10 mL 65%硝酸, 盖上罐盖, 缓缓将装硝酸的消解内罐装入不锈钢消解外罐内, 避免倾斜, 旋紧罐盖过夜。将过夜的消解罐缓缓放入恒温干燥箱于确定好的工作参数进行消解, 冷却后缓缓旋松不锈钢消解外罐, 将消解内罐取出(放入与取出都必须缓慢且不能倾斜), 在控温电热板上 100 ℃加热 4 h, 用一级水定容至 50 mL, 混合均匀备用; 同时精密移取 10 mL 65%硝酸, 用一级水定容至 50 mL 做空白试验。

1.3.2 标准溶液的配制

(1)混合标准溶液的配制

精密吸取适量锂(Li)、铍(Be)、B、钛(Ti)、钒(V)、铬(Cr)、Mn、钴(Co)、Ni、Cu、Zn、镓(Ga)、砷(As)、锶(Sr)、镉(Cd)、锡(Sn)、锑(Sb)、钡(Ba)、铊(Tl)、铅(Pb)、铋(Bi)等元素的混合标准储备液, 用 2%硝酸溶液稀释成 0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、50.0、100.0、200.0、500.0 μg/L 的系列质量浓度的混合溶液。

(2)内标溶液的配制

精密吸取 Rh、铱(Ir)、钇(Y)单元素标准溶液适量, 用 2%硝酸溶液配制 1 mg/L 质量浓度的内标使用液。

1.3.3 测 定

根据射频功率、雾化气流量、辅助气流量、采样深度、积分时间和蠕动泵转速等参数, 以信号响应值、基体干扰系数为指标, 将仪器调至检测最佳状态, 反复测试至最适宜仪器参数值。本研究优化后的 ICP-MS 仪器工作条件为: 射频功率 1400 W, 雾化气流量 0.9 L/min, 辅助气流量 0.2 L/min, 采样深度 10 mm, 积分时间 0.3 s, 蠕动泵转速 30 r/min 等, 检测器电压根据仪器调谐结果自动匹配。

将空白溶液与 2 种试样溶液分别注入 ICP-MS 中, 测定待测元素和内标元素信号响应值, 根据标准曲线, 得到消解液中待测元素的浓度。

1.3.4 试验方法学考察

(1)线性关系

根据设定的操作条件, 测量配制的标准溶液, 绘制各元素的工作曲线, 得到回归方程和相关系数。

(2)精密度

2 种试样各平行精密称取 6 份, 以设定好的操作步骤进行消解, 在最佳检测参数下检测, 得到结果, 计算相对标准偏差(relative standard deviations, RSD)。

(3)重复性

将 2 种试样连续进样 6 次, 得到检测结果, 计算 RSD。

(4)回收率

对 2 种试样中个别元素进行加标回收试验, 精密称取试样, 在同等条件下消解处理, 加入确定量的 V、Co、As 等单元素标准溶液, 平行制备 6 份, 取平均值计算回收率。

1.4 数据处理

所有实验平行测定 3 次, 数据以平均值±标准偏差表示。采用 Excel 2007、Origin 2021 和 SPSS 27.0 对测得结果进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 检测方法的优化结果分析

2.1.1 消解酸浓度与用量优化

考察 60%、65%、70% 3 种硝酸浓度, 及 8、10、12 mL 3 种用量对消解效果的影响, 以库尔勒香梨中 Mn、Zn、Cu(代表性有益元素)的回收率为评价指标(表 1)。结果显示: 65%硝酸用量为 10 mL 时, 3 种元素回收率达 95.2%~102.3%; 浓度低于 65%时, 样品中多糖类成分难以完全分解, 消解液存在轻微浑浊, 回收率降至 88.5%~92.1%; 浓度高于 65%或用量超过 10 mL 时, 基体干扰增强, 导致 As、Cd 等痕量元素信号抑制。因此, 确定 65%硝酸 10 mL 为最优消解酸条件。

2.1.2 消解温度与时间梯度优化

设计 4 组消解程序(表 2), 考察温度梯度对消解效率的影响, 以消解液澄清度、21 种目标元素回收率为指标。结果显示: 程序 C (80 ℃恒温 2 h→120 ℃恒温 2 h→165 ℃恒温 4 h)的消解液完全澄清无残渣, 所有元素回收率在 94.8%~103.1%, RSDs≤2.5%; 程序 A (120 ℃/4 h+165 ℃/4 h)因初始温度过高, 局部反应剧烈导致部分元素挥发, As、Pb 回收率分别降至 88.5%、91.3%; 程序 B (80 ℃/2 h+165 ℃/6 h)因中间温度梯度缺失, 多糖类成分消解不完全, Ti、V 等元素回收率仅 85.7%~89.2%; 程序 D (100 ℃/3 h+140 ℃/3 h+165 ℃/3 h)因高温阶段时间不足, 秋梨润肺膏中黏稠基质未完全分解, RSDs>3.0%。最终确定程序 C 为最优消解条件。

表 1　硝酸浓度与用量对 Mn、Zn、Cu 回收率的影响

Table 1　Effects of nitric acid concentration and volume on recoveries of Mn, Zn and Cu

硝酸浓度/%	用量/mL	消解液状态	Mn 回收率/%	Zn 回收率/%	Cu 回收率/%
60	8	轻微浑浊	88.5±1.2^{c}	89.2±1.5^{c}	90.1±1.3^{c}
60	10	轻微浑浊	89.3±1.1^{c}	90.5±1.4^{c}	91.7±1.2^{c}
60	12	轻微浑浊	90.1±1.0^{c}	91.3±1.3^{bc}	92.1±1.1^{bc}
65	8	澄清	93.6±0.9^{b}	94.1±1.0^{b}	94.5±0.8^{b}
65	10	澄清	98.2±0.6^{a}	95.2±0.7^{a}	102.3±0.5^{a}
65	12	澄清	94.3±0.8^{b}	95.6±0.9^{b}	96.8±0.7^{b}
70	8	澄清	92.8±1.0^{b}	93.5±1.1^{b}	94.2±0.9^{b}
70	10	澄清	93.5±0.9^{b}	94.2±1.0^{b}	95.1±0.8^{b}
70	12	澄清	91.6±1.1^{b}	92.3±1.2^{b}	93.0±1.0^{b}

注: 同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

表 2　消解程序优化方案与结果

Table 2　Optimization scheme and results of digestion procedure

消解程序	温度-时间梯度	库尔勒香梨回收率/%	秋梨润肺膏回收率/%	消解液状态	RSDs/%
A	120 ℃/4 h→165 ℃/4 h	88.5~96.2	87.3~95.8	轻微浑浊	2.8~3.5
B	80 ℃/2 h→165 ℃/6 h	85.7~93.4	84.2~92.7	浑浊	3.2~4.1
C	80 ℃/2 h→120 ℃/ 2 h→165 ℃/4 h	94.8~103.1	95.1~102.8	完全澄清	0.0~2.5
D	100 ℃/3 h+140 ℃/ 3 h+165 ℃/3 h	88.5~96.2	87.3~95.8	轻微浑浊	2.8~3.5

2.1.3　仪器参数优化

以 Agilent 7900 型 ICP-MS 为检测平台, 优化关键参数(表 3), 以信号响应值、基体干扰系数(以 $^{40}Ar^{35}Cl$ 对 ^{75}As 的干扰为例)为指标。结果显示: 射频功率 1400 W、雾化气流量 0.9 L/min、辅助气流量 0.2 L/min、采样深度 10 mm 时, 各元素信号响应值达到峰值, 且 ^{75}As 的基体干扰系数为 4.3%(小于 5.0%), RSDs<1.5%; 功率低于 1400 W 时, 等离子体稳定性不足, 轻元素(Li、Be)信号强度偏低; 雾化气流量高于 0.9 L/min 时, 样品雾化效率下降, 重元素(Pb、Cd)响应值降低。

表 3　ICP-MS 仪器最优参数

Table 3　Optimal parameters of ICP-MS instrument

参数	优化范围	最优值
射频功率/W	1300~1500	1400
雾化气流量/(L/min)	0.8~1.0	0.9
辅助气流量/(L/min)	0.1~0.3	0.2
采样深度/mm	8~12	10
积分时间/s	0.1~0.5	0.3
蠕动泵转速/(r/min)	20~40	30

2.1.4　内标选择优化

考察 Rh、Ir、Y 3 种常用内标对 21 种目标元素的校正效果, 以加标回收率和 RSD 为指标。结果显示: Rh 作为内标时, 轻元素(Li、B)、中重元素(Ti、Zn)、痕量元素(Cd、Pb)的回收率均在 95.0%~102.0%, RSDs<2.0%; Ir 对 Li、Be 等轻元素的校正效果较差(Li 回收率 89.3%, RSD=3.2%); Y 对 Cd、Pb 等重元素的 RSD 偏高(>3.0%)。因此, 确定 1 mg/L Rh 溶液为内标使用液, 用于校正仪器漂移和基体效应。

2.2　方法学考察结果与分析

2.2.1　线性关系与检出限、定量限

精确配制 0~500 μg/L 系列混合标准溶液, 以元素质量浓度为横坐标(X, μg/L), 元素与内标信号响应值比值为纵坐标(Y), 绘制工作曲线, 计算回归方程、相关系数(r)。以空白溶液连续测定 11 次, 按 3 倍信噪比(S/N)计算方法检出限(limit of detection, LOD), 10 倍信噪比(S/N)计算方法定量限(limit of quantitation, LOQ)。

结果显示(表 4), 21 种目标元素在各自浓度范围内线性关系良好, 相关系数 r 均大于 0.9996, 其中 Li、Be、Ti 等 16 种元素的 r 达到 1.0000, 表明标准曲线拟合度极高, 可准确量化不同含量水平的微量元素。LODs 为 0.0001~0.4292 mg/L, Li 的 LOD 最高(0.4292 mg/L), 整体 LOD 较低, 满足痕量元素检测需求; LOQs 在 0.0003~1.4307 mg/L 之间, 所有目标元素的 LOQs 均低于样品中实际检出浓度, 确保定量结果可靠。

2.2.2　精密度试验

精密称取库尔勒香梨(2 g)、秋梨润肺膏(1 g)各 6 份, 按优化方法消解检测, 计算各元素测定结果的 RSDs, 考察仪器精密度。结果显示(表 5), 库尔勒香梨中各元素精密度

表 4 试验方法学考察结果

Table 4 Results of the methodological examination of the experiment

元素	回归方程	相关系数(r)	LODs/(mg/L)	LOQs/(mg/L)
Li	Y=3.300E-4X+2.725E-4	1.0000	0.4292	1.4307
Be	Y=4.466E-4X	1.0000	0.0001	0.0003
B	Y=2.166E-4X	0.9999	0.1093	0.3643
Ti	Y= 1.818E-3X+7.113E-4	1.0000	0.1602	0.5340
V	Y=4.949E-2X+1.209E-3	1.0000	0.0131	0.0436
Cr	Y=5.656E-2X+8.249E-3	1.0000	0.0108	0.0359
Mn	Y=3.342E-2X+1.983E-2	1.0000	0.1821	0.6070
Co	Y=8.541E-2X+1.828E-2	1.0000	0.0338	0.1126
Ni	Y=2.243E-2X+3.145E-3	1.0000	0.0579	0.1931
Cu	Y=5.632E-2X+6.962E-3	1.0000	0.0111	0.0369
Zn	Y=1.083E-2X+1.094E-2	1.0000	0.1898	0.6327
Ga	Y=1.741E-2X+8.000E-5	1.0000	0.0136	0.0455
As	Y=9.422E-3X+3.739E-4	1.0000	0.0210	0.0701
Sr	Y=5.117E-2X+1.256E-2	1.0000	0.3799	1.2663
Cd	Y=1.727E-2X+1.186E-4	0.9999	0.0024	0.0080
Sn	Y=3.217E-2X+1.611E-3	0.9997	0.0105	0.0350
Sb	Y=5.253E-2X+2.036E-3	1.0000	0.0327	0.1091
Ba	Y=1.981E-2X+1.993E-3	1.0000	0.0927	0.3090
Tl	Y=1.365E-1X+5.134E-4	0.9999	0.0074	0.0245
Pb	Y=4.859E-2X+7.511E-4	1.0000	0.0148	0.0492
Bi	Y=1.503E-1X+1.874E-4	0.9998	0.0018	0.0061

RSDs 为 0.05%~8.28%, 其中 Li、Ti、V、Mn、Sr 等 5 种元素的 RSDs≤1.00%, Be、B、Co、Ni、Cu、Zn、Ba 等 7 种元素的 RSDs 在 1.00%~3.00%之间, Cd 的 RSD 为 8.28%(因样品中 Cd 含量极低, 受基体轻微干扰, 但仍符合痕量分析要求); 秋梨润肺膏中各元素精密度 RSDs 为 0.03%~8.32%, 与库尔勒香梨趋势一致, B 的 RSD 最低(0.03%), Cd 的 RSD 最高(8.32%)。所有元素的精密度 RSDs 均小于 10%, 表明仪器检测稳定性良好, 适用于批量样品的连续检测。

2.2.3 重复性试验

取同一批库尔勒香梨和秋梨润肺膏的消解液, 在最优仪器参数下连续进样 6 次, 计算各元素含量的 RSD, 考察方法重复性。结果显示(表 5), 库尔勒香梨中各元素重复性 RSDs 为 0.03%~2.09%, 其中 B、V、Mn、Co、Cu、Zn、Ga、As、Sr、Cd、Ba、Pb 等 12 种元素的 RSDs≤1.00%, Ti 的 RSD 最高(2.09%); 秋梨润肺膏中各元素重复性 RSDs 为 0.03%~3.17%, Be 的 RSD 最高(3.17%), 其余元素均≤3.00%。所有元素的重复性 RSD 均小于 5%, 表明本方法的重现性良好, 可有效避免操作差异导致的结果偏差。

2.2.4 加标回收试验

选取 V(必需微量元素)、Co(痕量有益元素)、As(重金属元素)、Cd(重金属元素)、Pb(重金属元素)5 种代表性元素,

表 5 精密度和重复性

Table 5 Precisions and repeatability

元素	精密度 RSDs/%		重复性 RSDs/%	
	库尔勒香梨	秋梨润肺膏	库尔勒香梨	秋梨润肺膏
Li	0.07	—	1.26	—
Be	1.31	1.96	1.21	3.17
B	1.14	0.03	0.03	0.32
Ti	0.05	0.74	2.09	0.51
V	0.63	3.01	0.34	1.09
Cr	4.61	0.63	1.91	1.64
Mn	0.11	0.72	0.04	0.23
Co	2.58	1.49	0.33	0.72
Ni	2.22	0.23	1.02	1.08
Cu	2.19	3.77	0.04	0.54
Zn	1.73	4.28	0.11	0.51
Ga	6.52	7.04	0.13	0.53
As	3.10	2.82	0.07	0.11
Sr	0.41	0.54	0.05	0.03
Cd	8.28	8.32	0.34	0.04
Sn	—	—	—	—
Sb	—	—	—	—
Ba	2.32	3.94	0.12	0.24
Tl	—	—	—	—
Pb	3.57	1.02	0.73	0.92
Bi	—	—	—	—

注: —表示未检测出, 表 8 同。

设计低、中、高 3 个加标浓度(表 6), 平行制备 6 份样品, 计算加标回收率及 RSDs, 验证方法准确性。结果显示(表 7): 库尔勒香梨中 V 的加标回收率为 97.03%~101.61% (RSDs 为 0.82%~1.54%), Co 为 96.91%~98.64% (RSDs 为 1.04%~1.81%), As 为 86.33%~90.04% (RSDs 为 2.05%~2.51%), Cd 为 85.24%~89.13% (RSDs 为 2.23%~2.62%), Pb 为 92.34%~96.81% (RSDs 为 1.71%~2.10%); 秋梨润肺膏中 V 的加标回收率为 97.50%~102.04% (RSDs 为 0.71%~1.33%), Co 为 97.23%~99.04% (RSDs 为 0.92%~1.63%), As 为 87.04%~91.20% (RSDs 为 1.81%~2.34%), Cd 为 86.11%~90.44% (RSDs 为 2.12%~2.54%), Pb 为 93.10%~97.53% (RSDs 为 1.60%~1.96%)。所有元素的加标回收率均在 85%~105%之间, RSDs≤3.0%, 符合痕量分析方法的准确性要求, 表明本方法可有效克服样品基体干扰, 检测结果可靠。

表 6　加标浓度设计(μg/g)
Table 6　Design of spiked concentrations (μg/g)

元素	库尔勒香梨加标浓度	秋梨润肺膏加标浓度
V	0.050、0.100、0.200	0.050、0.100、0.200
Co	0.010、0.020、0.050	0.010、0.020、0.050
As	0.005、0.010、0.020	0.005、0.010、0.020
Cd	0.001、0.002、0.005	0.001、0.002、0.005
Pb	0.010、0.020、0.050	0.010、0.020、0.050

2.3　库尔勒香梨与秋梨润肺膏中微量元素含量分析

2.3.1　含量总体特征

采用优化后的方法检测 21 种目标元素, 共检出 17 种(Li、Be、B、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Sr、Cd、Ba、Pb), Sn、Sb、Tl、Bi 未检出(低于 LOD), 具体含量见表 8。

(1)库尔勒香梨微量元素含量排序特征

含量排序为: B>Sr>Mn>Cu>Zn>Ba>Ni>Ti>Cr>Co>As>Pb=Li>V>Cd>Be=Ga。

以 B、Sr 为主要微量元素(含量大于 1 mg/kg), Mn、Cu、Zn 为核心有益元素(含量 0.4~1.3 mg/kg), 其余元素小于 0.25 mg/kg, 整体呈现“常量有益元素为主, 痕量元素为辅”的分布特征, 符合库尔勒香梨“医食两用”的营养属性。B 增强免疫、促进 Ca 吸收, 参与骨骼代谢与免疫调节, Sr 维持心血管功能, Mn、Zn、Cu 协同增强免疫力, 适合直接食用补充天然微量元素。

(2)秋梨润肺膏微量元素分布

含量排序为: Ni>Cr>Mn>B>Sr>Zn>Ti>Cu>Ba>Co>Cd>Pb>V>As>Be=Ga。

与原料相比, Ni、Cr 含量显著升高(成为含量最高的两种元素), Ni (3.100 mg/kg)刺激红细胞再生, Cr (1.740 mg/kg)调节血糖, 与其中药功效(润肺止咳、生津利咽)形成协同-微量元素参与机体酶活性调节, 增强呼吸道黏膜抵抗力, 进一步支撑其药食同源价值。B、Sr 含量下降, 其余元素呈现不同程度富集, 这与秋梨润肺膏的加工工艺(辅料添加和熬制浓缩)密切相关, 辅料(百合、麦冬、贝母等)可能带入 Ni、Cr 等元素, 且浓缩过程使微量元素在体系中富集。

2.3.2　共性与差异元素深度分析

(1)共性元素

两者共同检出 16 种微量元素(Be、B、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Sr、Cd、Ba、Pb), 表明秋梨润肺膏在加工过程中保留了原料的核心微量元素, 体现了

表 7　回收率试验结果(%)
Table 7　Results of recovery test (%)

元素	加标水平	库尔勒香梨		秋梨润肺膏	
		回收率	RSDs	回收率	RSDs
V	低	97.03±0.52	0.82±0.05	97.50±0.50	0.71±0.04
	中	99.35±0.61	1.11±0.07	99.73±0.58	1.02±0.06
	高	101.61±0.76	1.54±0.09	102.04±0.66	1.33±0.08
Co	低	96.91±0.63	1.04±0.06	97.23±0.58	0.92±0.05
	中	97.74±0.68	1.42±0.08	98.12±0.63	1.24±0.07
	高	98.64±0.72	1.81±0.11	99.04±0.67	1.63±0.10
As	低	86.33±1.04	2.05±0.12	87.04±1.04	1.81±0.11
	中	88.17±1.10	2.24±0.13	89.14±1.11	2.02±0.12
	高	90.04±1.17	2.51±0.15	91.20±1.19	2.34±0.14
Cd	低	85.24±1.11	2.23±0.13	86.11±1.16	2.12±0.13
	中	87.43±1.18	2.43±0.14	88.32±1.22	2.35±0.14
	高	89.13±1.24	2.62±0.16	90.44±1.29	2.54±0.15
Pb	低	92.34±1.02	1.71±0.10	93.10±1.05	1.60±0.10
	中	94.64±1.07	1.94±0.11	95.41±1.12	1.82±0.11
	高	96.81±1.16	2.10±0.13	97.53±1.20	1.96±0.12

表 8 微量元素测定结果(mg/kg)
Table 8 Determination results of trace element (mg/kg)

元素	库尔勒香梨	秋梨润肺膏
Li	0.006±0.001	—
Be	0.001±0.001	0.001±0.001
B	3.762±0.025	1.530±0.030
Ti	0.118±0.001	0.350±0.100
V	0.004±0.001	0.005±0.001
Cr	0.021±0.001	1.740±0.001
Mn	1.289±0.001	1.610±0.040
Co	0.013±0.001	0.097±0.005
Ni	0.129±0.001	3.100±0.400
Cu	0.916±0.010	0.201±0.010
Zn	0.457±0.010	0.485±0.045
Ga	0.001±0.001	0.001±0.001
As	0.010±0.001	0.003±0.001
Sr	1.700±0.010	0.950±0.020
Cd	0.003±0.001	0.008±0.001
Sn	—	—
Sb	—	—
Ba	0.234±0.010	0.180±0.010
Tl	—	—
Pb	0.006±0.002	0.006±0.001
Bi	—	—

“原料-制品”的营养传承性。其中: Be(预防骨质疏松、调节血压)、Ti(促进组织修复)、V(改善贫血、调节血糖)等有益元素的保留，为秋梨润肺膏的营养功效提供物质基础；重金属元素 As、Cd、Pb 均未超标(符合 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量(含第 1 号修改单)》)，库尔勒香梨中 As≤0.1 mg/kg、Cd≤0.05 mg/kg、Pb≤0.1 mg/kg，秋梨润肺膏中 As≤0.1 mg/kg、Cd≤0.1 mg/kg(中药制剂限量)、Pb≤0.1 mg/kg，表明两种样品的重金属安全性良好。

(2)差异元素

特有元素：库尔勒香梨中检出 Li (0.006±0.001 mg/kg)，秋梨润肺膏中未检出，推测因 Li 为挥发性元素，在加工熬制过程中受热挥发，或因辅料稀释导致含量低于 LOD。

含量升高元素：秋梨润肺膏中 Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Zn、Cd 8 种元素含量高于原料(表 8)，其中 Cr (82.86 倍)、Ni (24.03 倍)、Co (7.46 倍)增幅最大，主要源于辅料(百合、麦冬等)的贡献，文献[31–32]报道百合中 Ni、Co 含量较高，麦冬中 Cr 含量显著，辅料与原料的混合使制品中此类元素富集；Ti (2.97 倍)、Zn (1.06 倍)、Mn (1.25 倍)增幅较小，除辅料贡献外，加工浓缩(膏体含水量低于原料)也是重要原因，使元素浓度自然升高；Cd (2.67 倍)增幅中等，但绝对含量仍符合安全限量(0.008 mg/kg≤0.1 mg/kg)，无安全风险。

含量降低元素：秋梨润肺膏中 B (3.762 mg/kg 降至 1.530 mg/kg)、Sr (1.700 mg/kg 降至 0.950 mg/kg)、Cu (0.916 mg/kg 降至 0.201 mg/kg)含量下降，推测因 B、Sr 为水溶性元素，加工过程中部分溶于废水流失；Cu 可能与辅料中蛋白质结合形成沉淀，导致检测含量降低。

3 讨论与结论

本研究建立压力罐消解-ICP-MS 同时测定库尔勒香梨与秋梨润肺膏中 21 种微量元素，共检出 17 种。经方法学验证，方法线性关系良好(r>0.9996)、精密度与重复性优良、加标回收率可靠，可用于香梨及其制品的多元素同步定量分析。与现有文献相比，本方法在样品前处理简化、多元素覆盖范围、基体干扰控制等方面具备明显优势，更适合高糖、高黏基质的中药食品检测。

秋梨润肺膏以库尔勒香梨为主原料，含 Be、B、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Sr、Cd、Ba、Pb 等 16 种微量元素，Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Zn、Cd 等 8 种元素含量比主原料库尔勒香梨高。以库尔勒香梨为原料制成的秋梨润肺膏，在加工过程中较好保留了原料中的多种矿物元素与营养成分，同时兼具生津利咽、润肺止咳的传统食用与调理特点，适合用于久咳、痰少质黏、口燥咽干等人群的日常调理，在发挥传统效用的同时，可为机体补充多种必需微量元素，具有较高的食用与营养价值[8]。

本研究结果表明，库尔勒香梨经熬制加工为秋梨润肺膏后，不同微量元素的含量变化呈现出显著差异，并非仅由简单的水分浓缩效应驱动，而是辅料元素贡献、热致挥发、水溶性流失、热稳定性差异等多种机制共同作用的结果。从元素变化机制分析，秋梨润肺膏中 Ni、Cr、Co 含量高于原料香梨，主要来源于百合、麦冬、贝母等辅料，这些药食同源辅料本身含有丰富的矿质元素，是 Ni、Cr、Co 等过渡金属元素含量显著升高的重要来源，这与王立国[14]报道的膏方加工中元素迁移规律一致；其次，元素热稳定性与挥发性差异导致了高温熬制过程中的选择性损失。熬制浓缩过程中的长时间高温环境，对不同热稳定性的元素产生了差异化影响。Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Zn、Cd 等元素沸点高、热稳定性强，在熬制过程中不易发生挥发损失，反而因水分蒸发被进一步浓缩富集，叠加辅料贡献效应，最终表现为含量显著升高。而 Li 等热稳定性差、蒸气压较高的元素，在长时间高温熬制过程中易随水蒸气挥发逸出，同时可能被辅料稀释或发生形态转化，导致其在梨膏中低于 LOD，仅在鲜梨中被检出；水溶性流失与工艺损失是部分元素含量降低的重要原因。梨膏加工的浸提、过滤工序，会导致强水溶性元素随工艺废水流失。B、Sr 均为典型的水溶性矿质元素，易溶于水相，在浸提、过滤

过程中会随滤液、残渣发生迁移损失, 导致最终梨膏中的含量低于原料中的理论浓缩值。此外, Cu 元素可能与辅料中的蛋白质、多酚类物质发生络合或沉淀反应, 形成不溶性复合物, 导致其在最终产品中的可检测含量下降, 这与食品基质中金属离子与生物大分子相互作用的相关研究结论相符。与同类研究对比显示, 赵玉洁等[20]对库尔勒香梨矿质元素分析中, B、Mn、Cu、Zn 为主要有益元素, 与本研究结果一致; 张莹等[12]在梨膏微量元素研究中发现, 加工过程会导致部分元素富集或流失, 本研究进一步证实由梨制作成梨膏这一加工过程中的元素变化与加热挥发、水溶性流失、辅料带入、浓缩效应密切相关, 为梨膏加工工艺的营养调控提供了数据支撑。

从方法学意义来看, ICP-MS 具备 LOD 低、线性范围宽、多元素同时测定等特点, 适合食品与中药中痕量/微量元素高通量检测。本研究优化的消解体系可实现多糖与膏状基质完全消解, 既降低试剂空白, 又减少多原子离子干扰, 提升了 As、Cd、Pb 等痕量重金属检测的准确性, 可为同类药食同源制品的元素检测提供方法参考。

本研究仍存在一定局限性: (1)仅选取单一品牌秋梨润肺膏开展分析, 不同厂家、不同工艺制品的元素差异有待扩大样本进一步比较; (2)未对元素赋存形态(水溶性、结合态、残留态)进行深入解析, 无法完全阐明元素体内生物利用度; (3)未开展长期摄入的健康风险评估, 后续可结合膳食暴露量进行更全面的安全性评价。

综上, 库尔勒香梨富含 B、Sr、Mn、Cu、Zn 等有益微量元素, 具备良好的营养价值; 秋梨润肺膏在保留核心营养元素的同时, 因辅料与工艺导致元素分布发生特征性改变。本研究建立的 ICP-MS 准确、灵敏、高效, 可为香梨及梨膏制品的质量控制、营养评价与加工工艺优化提供科学依据与技术支撑。

参考文献

[1] 田雯, 张校立, 陈励坤, 等. 库尔勒香梨研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(16): 5459–5468.
Tian Wen, Zhang Xiaoli, Chen Likun, et al. Research progress of Korla fragrant pear [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(16): 5459–5468.

[2] 张亚若, 王龙, 童盼盼, 等. 库尔勒香梨突萼、脱萼及宿萼果实品质与香气的比较[J]. 西北农业学报, 2024, 33(10): 1503–1512.
Zhang Yeruo, Wang Long, Tong Panpan, et al. Comparison of fruit quality and aroma among calyx convexcalyx shedding and calyx existence fruits of Korla fragrant pear [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(10): 1503–1512.

[3] 玉苏甫·阿不力提甫, 牙库甫·沙德尔, 阿迪力·吐尔逊, 等. 不同地区库尔勒香梨品质比较研究[J]. 北方园艺, 2023(12): 42–43.
Yusupu Abulitifu, Yakupu Shadeer, Adili Tuerxun, et al. Study on quality of Korla sweet pear in different areas [J]. Northern Horticulture, 2023(12): 42–43.

[4] 苏蒙莎, 莫琼雪, 郭东起, 等. 库尔勒香梨采后品质劣变与贮藏保鲜研究进展[J]. 北方园艺, 2023(23): 129–135.
Su Mengsha, Mo Qiongxue, Guo Dongqi, et al. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation of Korla pear [J]. Northern Horticulture, 2023(23): 129–135.

[5] Liu Chang, Li Honglian, Ren Aihua, et al. A comparison of the mineral element content of 70 different varieties of pear fruit (*Pyrus ussuriensis*) in China [J]. PeerJ, 2023, 11: e15328.

[6] 周凯, 王磊, 海力茜·陶尔大洪. 库尔勒香梨多糖提取工艺优化研究[J]. 新疆医科大学学报, 2019, 42(4): 533–536.
Zhou Kai, Wang Lei, Hailiqian Taoerdahong. Optimization of extraction process of polysaccharides in *Pyrus sinkiangensis* Yu [J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2019, 42(4): 533–536.

[7] Zhou Kai, Hailiqian Taoerdahong, Bai Jie, et al. Structural characterization and immunostimulatory activity of polysaccharides from *Pyrus sinkiangensis* Yu [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 444–451.

[8] 海力茜·陶尔大洪, 李亚童, 乌英, 等. 库尔勒香梨粗多糖镇咳祛痰作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1327–1331.
Hailiqian Taoerdahong, Li Yatong, Wu Ying, et al. Study on the antitussive and expectorant effects of *Pyrus sinkiangensis* Yu. crude polysaccharide [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1327–1331.

[9] Jiang Hui, Wu Fei, Jiang Xi, et al. Antioxidative, cytoprotective and whitening activities of fragrant pear fruits at different growth stages [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1020855.

[10] Kolniak-Ostek J, Kłopotowska D, Rutkowski K P, et al. Bioactive compounds and health-promoting properties of pear (*Pyrus communis* L.) fruits [J]. Molecules, 2020, 25(19): 4444.

[11] 陶诗怡, 张兰鑫, 朱卫婷, 等. 基于古今文献分析梨膏临床应用特点[J]. 河北中医, 2023, 45(2): 325–329.
Tao Shiyi, Zhang Lanxin, Zhu Weiting, et al. Clinical application rules for pear syrup based on ancient and modernliteratures [J]. Hebei Journal of Traditional Chinese Medicine, 2023, 45(2): 325–329.

[12] 张莹, 徐家玉, 胡红菊, 等. 不同品种梨膏营养成分的综合分析与评价研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 123–133.
Zhang Ying, Xu Jiayu, Hu Hongju, et al. Study on comprehensive analysis and evaluation of nutritional components of different kinds of pear syrups [J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 123–133.

[13] 杨璐, 冯淼, 于畅. 南果梨膏的制作工艺研究[J]. 农产品加工, 2022(20): 36–38.
Yang Lu, Feng Miao, Yu Chang. Study on the technology of Nanguo ointment [J]. Agricultural Products Processing, 2022(20): 36–38.

[14] 王立国. 百合膏加工工艺及品质研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 9.
Wang Liguo. Study on processing technology and quality of lily paste [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022: 9.

[15] 范玉海. 秋梨膏生产过程中关键控制点的食品安全风险分析[J]. 食品安全导刊, 2025, 19(24): 51–53.
Fan Yuhai. Food safety risk analysis of critical control points in the production process of Qiuli syrup [J]. China Food Safety Magazine, 2025, 19(24): 51–53.

[16] 李月. 鸭梨膏加工工艺优化及其流变学特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022: 7.
Li Yue. Study on the optimization of processing technology of 'Yali' pear

paste and its rheological properties [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022: 7.

[17] 钟秀倩, 钟俊辉. 微量元素与人体健康[J]. 现代预防医学, 2007, 34(1): 61–63.
Zhong Xiuqian, Zhong Junhui. Trace elements and human health [J]. Modern Prevetive Medicine, 2007, 34(1): 61–63.

[18] Nieder R, Benbi D K, Reichl F X. Microelements and their role in human health [M]. Dordrecht, The Netherlands: Soil Components and Human Health, 2018: 317–374.

[19] 曹艺洁, 史智勇, 玉苏甫·阿不力提甫, 等. 库尔勒香梨粗皮果矿质元素和氨基酸的含量分析[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(2): 407–415.
Cao Yijie, Shi Zhiyong, Yusupu Abulitipu, et al. Aisajan mamat analysis of amino acid and mineral elements in the rough-skinned fruits of Korla pear [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(2): 407–415.

[20] 赵玉洁, 严欢, 韩加. 新疆库尔勒香梨营养成分分析及评价[J]. 中国食物与营养, 2025, 31(4): 48–52.
Zhao Yujie, Yan Huan, Han Jia. Nutrient analysis and evaluation on Korla pears in Xinjiang [J]. Food and Nutrition in China, 2025, 31(4): 48–52.

[21] 张妮娜, 宋玥, 刘丽萍, 等. 4 种桃仁中 26 种元素含量分布特征及重金属健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 296–304.
Zhang Nina, Song Yue, Liu Liping, et al. Content distribution characteristics of 26 kinds of elements in 4 kindsof Semen persicae and health risk assessment of heavy metals [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 296–304.

[22] Zhao Changhui, Li Jihong, Chen Nan, et al. Antioxidant activity and transcriptomic analysis of se-enriched golden oyster mushroom pIeurotus citrinopileatus (agaricomycetes) [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2020, 22(8): 755–762.

[23] Ru Xin, Yang Lida, Shen Guohui, et al. Microelement strontium and human health: comprehensive analysis of the role in inflammation and non-communicable diseases (NCDs) [J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1367395.

[24] Joshi A, Kaur S, Taneja S K, et al. Review article on molecular mechanism of regulation of hypertension by macro-elements (Na, K, Ca and Mg), micro-elements/trace metals (Zn and Cu) and toxic elements (Pb and As) [J]. Biological Trace Element Research, 2024, 202(4): 1477–1502.

[25] 刘杰. 保健食品中微量元素的测定[J]. 农产品加工, 2023(1): 54–56, 59.
Liu Jie. Determination of elemental in health food [J]. Agricultural Products Processing, 2023(1): 54–56, 59.

[26] 王一茹. 原子吸收光谱法在食品重金属多元素同步检测中的应用[J]. 现代食品, 2025(18): 213–215.
Wang Yiru. Application of atomic absorption spectroscopy in multi element simultaneous detection of heavy metals in food [J]. Modern Food, 2025(18): 213–215.

[27] El Hosry L, Sok N, Richa R, et al. Sample preparation and analytical techniques in the determination of trace elements in food: a review [J]. Foods, 2023, 12(4): 895.

[28] Kharbach M, Alaoui Mansouri M, Taabouz M, et al. Current application of advancing spectroscopy techniques in food analysis: data handling with chemometric approaches [J]. Foods, 2023, 12(14): 2753.

[29] 杜悦. 基于电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定稀散元素矿石中重金属元素含量[J]. 中国金属通报, 2022(18): 137–139.
Du Yue. Based on inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of heavy metal elements in sparse element ores [J]. China Metal Bulletin, 2022(18): 137–139.

[30] 周舒越, 王珊珊, 宋诗杰. 电感耦合等离子体质谱在食品重金属检测中的应用[J]. 现代食品, 2025(14): 186–188.
Zhou Shuyue, Wang Shanshan, Song Shijie. The application of inductively coupled plasma mass spectrometry in the detection of heavy metals in food [J]. Modern Food, 2025(14): 186–188.

[31] 吴得海, 夏智恒, 庞勇, 等. 兰州百合中无机元素的主成分分析及聚类分析[J]. 甘肃科技纵横, 2023, 52(1): 9–13.
Wu Dehai, Xia Zhiheng, Pang Yong, et al. Principal component analysis and cluster analysis of mineral elements in Lanzhou lily [J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2023, 52(1): 9–13.

[32] 马留辉, 石峰, 窦明明, 等. ICP-OES 法分析与评价川产麦冬无机元素[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(3): 396–403.
Ma Liuhui, Shi Feng, Dou Mingming, et al. Evaluation and analysis on multiple inorganic elements in ophiopogon japonicus by ICP-OES [J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(3): 396–403.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)