DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260401003
**引用格式**: 巩俐彤, 杨新宇, 周天慧, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法检测枸杞中 31 种无机元素及产地和工艺差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 185–191.
Gong Litong, Yang Xinyu, Zhou Tianhui, et al. Determination of 31 kinds of inorganic elements in *Lycium barbarum* by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry and analysis of differences in origin and processes [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 185–191. (in Chinese with English abstract).

# 微波消解-电感耦合等离子体质谱法检测枸杞中 31 种无机元素及产地和工艺差异分析

巩俐彤[1], 杨新宇[2], 周天慧[3], 刘丽萍[3*]

[1. 北京市大兴区疾病预防控制中心(区卫生健康监督所), 北京 102600; 2. 北京经济技术开发区疾病预防控制中心, 北京 100176; 3. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013]

**摘 要: 目的** 测量来自青海、宁夏、甘肃、新疆 4 个产区的新鲜枸杞、传统干制枸杞和锁鲜干枸杞样本中的 31 种无机元素, 分析、比较不同产地、不同工艺枸杞中无机元素的含量。**方法** 采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法测量枸杞中的 31 种无机元素; 采用 WPS 12.1.0.26375 整理数据, 使用 *R* 通过单因素方差分析对不同地区、不同工艺枸杞中的无机元素进行差异性分析。**结果** 枸杞中含量较高的元素由高到低依次为 K、Na、Mg、Ca、Fe、Al、Zn、B、Cu、Mn、Sr、Rb。对 4 个产区鲜枸杞样品中上述 12 种无机元素进行差异性分析, 除 Rb 无显著性差异($P$>0.05)以外, 其余 11 种无机元素均存在统计学差异($P$<0.05)。宁夏传统干制枸杞中 Na、Fe、Al 含量是鲜枸杞的 5.2~6.4 倍, 而锁鲜干枸杞中 Na、Fe、Al 含量是鲜枸杞的 1.8~2.8 倍。**结论** 微波消解-电感耦合等离子体质谱法准确可靠, 可同时分析枸杞中的常量、微量和痕量元素, 适用于多种场景下枸杞中无机元素的高通量分析。传统干制工艺中枸杞 Na、Al 异常富集现象显著, 锁鲜工艺则可消除异常富集。应重视针对老年人等特殊群体食用枸杞的健康教育。

**关键词:** 枸杞; 无机元素; 高通量分析; 干制工艺; 风险评估
**中图分类号:** R155 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0185–07

# Determination of 31 kinds of inorganic elements in *Lycium barbarum* by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry and analysis of differences in origin and processes

GONG Li-Tong[1], YANG Xin-Yu[2], ZHOU Tian-Hui[3], LIU Li-Ping[3*]

[1. *Daxing District Center for Disease Control and Prevention* (*District Health Supervision Institute*), *Beijing* 102600, *China*; 2. *Beijing Economic-Technological Development Area Center for Disease Control and Prevention*, *Beijing* 100176, *China*; 3. *Beijing Center for Disease Control and Prevention*, *Beijing* 100013, *China*]

**ABSTRACT: Objective** To test 31 kinds of inorganic elements in fresh, traditionally dried and vacuum-sealed dried

**收稿日期:** 2026-04-01
**第一作者:** 巩俐彤(1981—), 女, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为卫生理化检验。E-mail: 6812107@qq.com
***通信作者:** 刘丽萍(1965—), 女, 教授/主任技师, 主要研究方向为与健康相关的有害物质和营养成分分析研究。E-mail: llp9312@163.com

*Lycium barbarum* from 4 major producing regions (Qinghai, Ningxia, Gansu and Xinjiang) in China, analyze and compare the content variations across different geographical origins and processing techniques. **Methods** Microwave digestion coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry was employed to determine the concentrations of 31 kinds of inorganic elements in *Lycium barbarum*. WPS 12.1.0.26375 was used to organize data, and one-way analysis of variance was performed using *R* software to analyze the differences in inorganic elements among *Lycium barbarum* from different regions and processing methods. **Results** The elements with the highest content in *Lycium barbarum*, ranked in descending order, were K, Na, Mg, Ca, Fe, Al, Zn, B, Cu, Mn, Sr and Rb. For the 12 kinds of aforementioned elements in fresh *Lycium barbarum* from the 4 regions, all except Rb showed statistically significant differences ($P$<0.05), while Rb exhibited no significant variation ($P$>0.05). In Ningxia samples, the content of Na, Fe, and Al in traditionally dried *Lycium barbarum* were 5.2–6.4 times those in fresh ones, whereas in vacuum-sealed dried *Lycium barbarum* these elements were 1.8–2.8 times higher than in fresh ones. **Conclusion** The microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry method is accurate and reliable, enabling simultaneous analysis of macroelements, microelements and trace elements in *Lycium barbarum*, and is suitable for high-throughput analysis of inorganic elements in *Lycium barbarum* across multiple scenarios. The traditional drying process leads to abnormal enrichment of Na and Al in *Lycium barbarum*, which can be mitigated by the vacuum-sealed drying process. Special attention should be paid to health education on *Lycium barbarum* consumption for vulnerable populations such as the elderly.

**KEY WORDS:** *Lycium barbarum*; inorganic elements; high-throughput analysis; drying process; risk assessment

## 0 引 言

枸杞为茄科枸杞属多年生灌木，是我国重要的药食同源资源，主产于宁夏、甘肃、青海、新疆、内蒙古等地，2023 年产业规模突破 300 亿元[1–2]。枸杞富含枸杞多糖、类胡萝卜素、甜菜碱等活性成分，具有抗氧化、免疫调节、神经保护等生物活性[3–4]。随着大健康产业发展，枸杞干、枸杞原浆、功能性食品等市场需求持续增长。然而产业快速发展背后的质量安全问题日益凸显。2024 年央视“3•15”晚会曝光部分产区使用工业硫磺熏制枸杞，导致二氧化硫超标及砷污染，引发社会广泛关注[5]。枸杞加工环节存在添加剂滥用、工艺控制缺失等系统性风险，亟需建立从产地到餐桌的全链条质量安全评价体系。无机元素是枸杞品质的重要构成部分，枸杞既包含 K、Na、Mg、Ca 等营养必需元素，也涉及 Pb、Cd、As 等潜在有害元素，其含量受土壤环境、农业投入品、加工工艺等多重因素影响[6–8]。枸杞中无机元素分析经历了从原子吸收光谱(atomic absorption spectrum, AAS)、电感耦合等离子体发射光谱(inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES)到电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)的技术演进。AAS 灵敏度有限，难以同时测定多元素；ICP-OES 可检测常量及微量元素，但检出限(mg/kg 级)无法满足痕量元素分析需求[9]。ICP-MS 具有检出限低、动态范围宽、多元素同时测定等优势，已成为食品元素分析的主流技术[10]。庞靖等[11]采用微波消解-ICP-MS 同时测定枸杞中 19 种元素，但未涉及方法学系统验证；因此建立适用于复杂基质中常量元素、微量元素以及痕量元素的高通量、高灵敏度的无机元素分析方法在应对枸杞食用安全评价中十分必要[12]。鉴于此，本研究拟通过微波消解-ICP-MS 分析枸杞中的 31 种无机元素，比较不同产地、不同工艺枸杞中无机元素可能存在的差异，为枸杞的食用安全提供技术支撑和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜枸杞于 2024 年 7—8 月取自青海、宁夏、甘肃、新疆 4 个产区，共 38 份。干枸杞同样取自上述产区，共 163 份；其中传统干制枸杞 133 份，锁鲜干枸杞 30 份，锁鲜干枸杞均来自宁夏。

超纯水，电阻率 18.2 MΩ•cm(美国 Millipore 公司)；硝酸($HNO_3$，纯度 65%，*V*:*V*，德国 Merck 公司)；Li、Sc、Ge、Rh、In、Tb、Lu、Bi 内标混合溶液(质量浓度 100 mg/L)、Ca、Fe、K、Mg、Na 混合标准储备溶液(质量浓度 1000 μg/mL)、Ag、Al、As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb、Se、Th、TI、U、V、Zn 混合标准储备溶液(质量浓度 10 μg/mL)(美国 Agilent 公司)；Li、B、Sr、Sn、Rb 单元素标准溶液(质量浓度 100 μg/mL，中国计量科学研究院)；Hg 单元素标准溶液(质量浓度 100 μg/L，国家地质实验研究中心)；大米粉标准物质(NIST SRM 1568b，美国国家标准与技术研究院)。

### 1.2 仪器与设备

Agilent 7700x 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司)；GRD-1 平行研磨仪(北京微思行公司)；

Millipius IQ7015 超纯水处理系统(美国 Millipore 公司); Preekem TOPEx+ 微波消解仪(上海屹尧公司); AL204DU-IC 电子天平(精度为 0.1 mg/1 mg, 瑞士 Mettler Toledo 公司)。

### 1.3　样本预处理和前处理

1.3.1　样本预处理

使用清水清洗鲜枸杞果实, 然后使用超纯水冲洗样品 3 次, 放置阴凉通风处晾干至果实表面无残留水分且果实表面尚未发生皱缩的状态, 使用平行研磨仪将样品研磨成均质, 装瓶后–20 ℃冷冻保存备用。

1.3.2　样本前处理

称取鲜枸杞样品 1.5 g(或干枸杞样品 0.6 g, 干枸杞样本的含量预估考量了水分流失等因素)于聚四氟乙烯消解罐内, 后加入 6 mL 硝酸, 使用微波消解仪按 100 ℃ 3 min、130 ℃ 5 min、170 ℃ 5 min、190 ℃ 20 min 的程序进行消解。消解后待样品冷却至室温, 定容至 25 mL 备用。空白试验同样品操作全过程。

### 1.4　ICP-MS 测定 31 种无机元素

1.4.1　ICP-MS 工作条件

射频入射频率为 1550 W, 载气(高纯氩气)流速为 1.1 L/min, 射频电压为 1.80 V, 采样深度为 8.0 mm, 泵速为 0.1 r/s。

1.4.2　标准曲线浓度范围

根据枸杞中各元素的浓度水平选择其标准曲线范围。具体分别如下: K、Na、Ca、Mg、Fe 5 种元素质量浓度为 0.0、100、500、1000、5000、10000、30000 μg/L; Li、B、Sr、Sn、Rb、Cu、Mn、Al、Zn 9 种元素质量浓度为 0.0、1.0、5.0、10.0、50.0、100、300 μg/L; Ag、As、Ba、Be、Cd、Co、Cr、Mo、Ni、Pb、Sb、Se、Th、TI、U、V 16 种元素质量浓度为 0.0、0.5、1.0、5.0、10.0、50.0、100 μg/L; Hg 质量浓度为 0.0、0.1、0.5、1.0、3.0 μg/L。

1.4.3　有证标准物质

目前尚无枸杞类基质有证标准物质, 故选用同为植物类基质的米粉有证标准物质(NIST SRM 1568b)考察方法的准确度。

### 1.5　食用风险评估

采用危害商(hazard quotient, HQ)法评估异常元素的慢性暴露风险。已知 HQ=EED/RfD, 式中 EED 为估计每日暴露量(estimated daily exposure), mg/d; RfD 为参考剂量(reference dose), mg/d; EED=C×IR, *C* 指某种异常元素的含量, mg/kg; IR 为每日摄入量(ingestion rate), kg/d。HQ<0.1 为可忽略风险, 0.1≤HQ<1 为低风险, HQ≥1 为高风险。

### 1.6　数据处理

WPS 12.1.0.26375 整理数据, R 4.3.1 进行统计分析。采用 One-way ANOVA 或 Welch's ANOVA(方差不齐时)比较组间差异, Tukey HSD 或 Games-Howell 法进行事后检验。

## 2　结果与分析

### 2.1　微波消解-ICP-MS 优化和验证

采用密闭式的微波消解法, 配以 $HNO_3$ 消解体系, 通过优化的微波消解程序, 结果显示枸杞中糖类等物质完全分解, 消解液澄清透明。范围内 31 种元素标准曲线的线性相关系数均大于 0.999, 线性关系在一定浓度良好。枸杞加标回收率为 84.5%~121.3%, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)≤6.0%。31 种元素的相关系数、线性方程、加标回收率和 RSDs 见表 1。将配制的系列浓度混合标准溶液, 在 ICP-MS 最佳检测条件下进行检测, 以待测元素的信号响应值为纵坐标, 以浓度为横坐标进行线性回归, 由方程 y=a+bx 表示, 在标准曲线范围内各元素的线性相关系数(*r*)均大于 0.999。采用试剂空白溶液测定检出限, 取 10 次试剂空白溶液的测定结果及 3 次平行测定一定浓度各元素标准溶液的结果, 确定方法检出限(limit of detection, LOD)和定量限(limit of quantitation, LOQ)。当鲜枸杞的称样量为 1.5 g, 定容体积为 25 mL 时, 检出限范围为 0.001~0.167 mg/kg, 定量限范围为 0.002~0.501 mg/kg; 当干枸杞的称样量为 0.6 g, 定容体积为 25 mL 时, 检出限范围为 0.002~0.417 mg/kg, 定量限范围为 0.005~1.250 mg/kg。

**表 1　31 种元素性能评价指标结果**

**Table 1　Results of performance evaluation indicators for 31 kinds of elements**

| 元素 | 相关系数(*r*) | 标准方程 | 加标回收率/% | RSDs/% |
|---|---|---|---|---|
| K | 1.0000 | *Y*=0.0077*X*+0.4634 | 107.6 | 1.2 |
| Na | 1.0000 | *Y*=0.0060*X*+0.4997 | 100.5 | 3.5 |
| Mg | 1.0000 | *Y*=0.0028*X*+0.0103 | 116.2 | 2.6 |
| Ca | 1.0000 | *Y*=1.3568E-004*X*+0.0154 | 102.2 | 0.8 |
| Fe | 1.0000 | *Y*=0.0207*X*+0.0521 | 100.2 | 3.6 |
| Al | 1.0000 | *Y*=0.0012*X*+0.0045 | 100.5 | 3.4 |
| Zn | 0.9999 | *Y*=6.3675E-004*X*+4.7161E-004 | 105.3 | 4.2 |
| B | 0.9999 | *Y*=7.1074E-004*X*+0.0017 | 96.8 | 2.3 |
| Cu | 0.9999 | *Y*=0.0189*X*+0.0024 | 113.8 | 2.5 |

表 1(续)

| 元素 | 相关系数($r$) | 标准方程 | 加标回收率/% | RSDs/% |
|---|---|---|---|---|
| Mn | 1.0000 | $Y$=0.0170$X$+6.3762E-004 | 100.0 | 3.3 |
| Sr | 1.0000 | $Y$=0.0053$X$+6.1008E-004 | 108.2 | 1.5 |
| Rb | 1.0000 | $Y$=0.0050$X$+5.2391E-005 | 105.7 | 1.4 |
| Ba | 1.0000 | $Y$=0.0014$X$+9.5843E-005 | 111.0 | 1.8 |
| Ni | 1.0000 | $Y$=0.0076$X$+5.3573E-004 | 104.4 | 1.5 |
| Li | 1.0000 | $Y$=0.0040$X$+0.0204 | 119.5 | 3.7 |
| Mo | 1.0000 | $Y$=0.0151$X$+2.2137E-004 | 106.5 | 2.2 |
| Cr | 0.9999 | $Y$=0.0516$X$+0.0050 | 113.5 | 5.2 |
| Pb | 1.0000 | $Y$=0.0033$X$+1.2348E-004 | 116.2 | 6.0 |
| Se | 0.9999 | $Y$=3.8650E-004$X$+4.1126E-004 | 84.5 | 2.6 |
| Co | 1.0000 | $Y$=0.0318$X$+1.8753E-004 | 95.8 | 3.1 |
| Cd | 0.9999 | $Y$=0.0068$X$+3.8627E-005 | 121.3 | 2.8 |
| V | 1.0000 | $Y$=0.0450$X$+1.6316E-004 | 113.8 | 2.7 |
| Sn | 1.0000 | $Y$=0.0031$X$+1.4082E-004 | 108.6 | 2.1 |
| As | 0.9999 | $Y$=0.0026$X$+5.8971E-005 | 100.4 | 3.2 |
| U | 1.0000 | $Y$=0.0137$X$+3.9725E-005 | 116.7 | 3.0 |
| Hg | 1.0000 | $Y$=0.0021$X$+0.0000275 | 106.2 | 1.6 |
| Sb | 1.0000 | $Y$=0.0037$X$+0.0059 | 101.4 | 3.2 |
| Ag | 0.9999 | $Y$=0.0392$X$+5.9852E-004 | 95.9 | 1.2 |
| Th | 1.0000 | $Y$=0.0136$X$+1.7631E-004 | 113.1 | 3.0 |
| Tl | 1.0000 | $Y$=0.0097$X$+3.9020E-005 | 111.2 | 2.6 |
| Be | 0.9999 | $Y$=0.0010$X$+7.2965E-006 | 93.3 | 1.6 |

### 2.2 枸杞中元素含量基本特征

38 份鲜枸杞样品中含量较高的元素由高到低依次为 K、Na、Mg、Ca、Fe、Al、Zn、B、Cu、Mn、Sr、Rb。上述 12 种元素占总无机元素质量的 99.5%以上, 构成枸杞的基本矿物营养谱。163 份干枸杞样品中含量较高的元素由高到低排列为 K、Na、Mg、Ca、Fe、Al、Zn、B、Mn、Cu、Sr、Rb。鲜、干枸杞样品中 31 种元素的测量值见表 2。

### 2.3 不同产地鲜枸杞元素差异分析

采用 One-Way ANOVA 分析或 Welch's ANOVA 分析以及事后多重检验对 4 个产区鲜枸杞样品中的上述 12 种元素的平均含量进行差异性分析。结果显示 4 个产区鲜枸杞样本中的 Rb 无显著性差异($P$>0.05), 其余 11 种元素均存在显著性差异($P$<0.05)。见表 3。

### 2.4 枸杞中有害元素安全性评价

所有样本的 Pb、Cd、As、Hg、Cu 和 Cr 元素均符合相关限量标准, Be、TI、Th、U 等有害元素的含量均符合相关限量标准。见表 4。然而, 干枸杞中 Na、Al 含量处于较高水平。Na 均值 5397 mg/kg, 最大值 10790 mg/kg; Al 均值 62.6 mg/kg, 最大值 228.9 mg/kg。虽然二者均非 GB 2762—2022、《中华人民共和国药典》及《中医药—中草药重金属限量》等文件中所管控的有害元素, 但长期过量摄入仍存在健康隐患。

表 2 枸杞中 31 种无机元素的测量值

Table 2 Measurement values of 31 kinds of inorganic elements in *Lycium barbarum*

| 元素 | 鲜枸杞均值/(mg/kg) | 干枸杞均值/(mg/kg) | 元素 | 鲜枸杞均值/(mg/kg) | 干枸杞均值/(mg/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| K | 4417 | 20543 | Cr | 0.015 | 0.540 |
| Na | 735 | 5397 | Pb | 0.013 | 0.083 |
| Mg | 240 | 1071 | Se | 0.012 | 0.031 |
| Ca | 110 | 630 | Co | 0.012 | 0.063 |
| Fe | 7.95 | 66.10 | Cd | 0.010 | 0.048 |
| Al | 4.24 | 62.60 | V | 0.007 | 0.090 |
| Zn | 2.81 | 12.00 | Sn | 0.004 | 0.017 |
| B | 2.55 | 9.71 | As | 0.002 | 0.042 |
| Cu | 2.37 | 8.18 | U | 0.001 | 0.004 |
| Mn | 2.07 | 9.03 | Hg | 0.001 | 0.003 |
| Sr | 1.58 | 6.07 | Sb | <0.002 | <0.002 |
| Rb | 0.509 | 3.400 | Ag | <0.001 | 0.003 |
| Ba | 0.237 | 0.889 | Th | <0.001 | 0.011 |
| Ni | 0.187 | 0.881 | Tl | <0.001 | 0.003 |
| Li | 0.183 | 1.260 | Be | <0.001 | 0.002 |
| Mo | 0.061 | 0.190 | | | |

**表 3　4 个产区鲜枸杞样品中元素含量及差异性分析**

**Table 3　Analysis of element content and differences in 4 producing regions of fresh *Lycium barbarum***

| 元素 | 宁夏 | | 甘肃 | | 青海 | | 新疆 | | 显著性水平 *P* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 测定值/(mg/kg) | 均值±标准偏差/(mg/kg) | 测定值/(mg/kg) | 均值±标准偏差/(mg/kg) | 测定值/(mg/kg) | 均值±标准偏差/(mg/kg) | 测定值/(mg/kg) | 均值±标准偏差/(mg/kg) | |
| K | 3334~4996 | 4223±428 | 4188~5423 | 4788±474 | 4325~6197 | 5102±679 | 4161~4798 | 4570±230 | <0.05 |
| Na | 505~1281 | 839±200 | 437~890 | 662±149 | 502~1032 | 797±208 | 500~667 | 604±54 | <0.05 |
| Mg | 139~347 | 271±52 | 174~267 | 227±29 | 154~226 | 196±27 | 180~284 | 229±37 | <0.05 |
| Ca | 18~160 | 113±32 | 32~147 | 128±29 | 68~176 | 131±35 | 100~213 | 157±42 | <0.05 |
| Fe | 4.29~18.40 | 10.90±4.22 | 3.39~12.30 | 7.56±3.59 | 4.66~9.40 | 7.01±1.86 | 3.89~11.20 | 7.94±2.69 | <0.05 |
| Al | 0.59~14.40 | 9.00±4.04 | 1.55~8.22 | 4.94±2.61 | 1.50~3.18 | 2.41±0.58 | 0.56~1.26 | 0.97±0.30 | <0.05 |
| Zn | 1.76~3.79 | 2.57±0.71 | 2.25~3.33 | 2.95±0.34 | 1.89~2.97 | 2.36±0.40 | 3.25~6.81 | 5.16±1.25 | <0.05 |
| B | 1.98~3.15 | 2.67±0.33 | 1.90~2.52 | 2.21±0.22 | 2.13~3.24 | 2.74±0.36 | 2.13~3.24 | 2.62±0.24 | <0.05 |
| Cu | 1.40~3.42 | 2.27±0.56 | 1.92~2.81 | 2.54±0.29 | 1.86~3.01 | 2.29±0.47 | 2.43~4.75 | 3.34±0.87 | <0.05 |
| Mn | 1.44~2.96 | 2.20±0.44 | 1.48~3.26 | 2.57±0.54 | 1.39~1.98 | 1.72±0.26 | 1.39~1.98 | 1.80±0.44 | <0.05 |
| Sr | 0.794~4.920 | 2.550±1.140 | 0.645~1.210 | 1.060±0.210 | 0.439~1.920 | 1.260±0.590 | 0.439~1.920 | 1.000±0.280 | <0.05 |
| Rb | 0.265~0.590 | 0.440±0.090 | 0.263~1.500 | 0.890±0.580 | 0.329~0.909 | 0.660±0.240 | 0.329~0.909 | 0.810±0.270 | >0.05 |

**表 4　有害元素限量及枸杞测定值**

**Table 4　Limit of harmful elements and determination values of *Lycium barbarum***

| 元素 | 鲜枸杞/(mg/kg) | 干枸杞/(mg/kg) | 限量值①/(mg/kg) | 限量值②/(mg/kg) | 限量值③/(mg/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| Pb | 0.001~0.069 | 0.008~0.096 | 0.1 | 5 | 10 |
| Cd | 0.002~0.041 | 0.012~0.049 | 0.05 | 1 | 2 |
| As | 0.000~0.004 | 0.006~0.046 | 0.5 | 2 | 4 |
| Hg | 0.000~0.008 | 0.000~0.010 | 0.01 | 0.2 | 0.2 |
| Cu | 1.399~4.749 | 3.410~14.300 | — | 20 | — |
| Cr | 0.002~0.100 | 0.006~0.183 | 0.5 | — | — |

注: 限量值①源自 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》, 限量值②源自《中华人民共和国药典》, 限量值③源自《中医药—中草药重金属限量》; —代表相关文件中未对该元素做出明确的限量要求。

## 2.5　鲜、干枸杞中元素的对比分析

### 2.5.1　鲜枸杞与传统干制枸杞之间的对比分析

比较鲜、干枸杞内含量较高的 12 种无机元素。干枸杞普遍高于鲜枸杞, 富集倍数为 3.5~14.8 倍。干枸杞中 K、Mg、Ca、Zn、B、Cu、Mn、Sr 8 种元素的含量是鲜枸杞的 3.5~5.7 倍; 干枸杞中 Rb 元素的含量是鲜枸杞的 6.7 倍; Na、Fe、Al 的含量是鲜枸杞的 7.3~14.8 倍。

### 2.5.2　不同干制工艺枸杞之间的对比分析

宁夏传统干制枸杞 12 种常见元素均值为鲜枸杞元素均值的 2.4~7.7 倍。锁鲜干枸杞中 12 种常见元素均值为鲜枸杞元素均值的 0.9~4.8 倍。其中, 传统干制枸杞 Na、Fe、Al 的含量是鲜枸杞的 5.2~6.4 倍, 是锁鲜干枸杞的 3.5 倍、2.2 倍、2.5 倍。见表 5。

**表 5　宁夏地区各类枸杞样品中元素含量**

Table 5　Elemental content in various *Lycium barbarum* samples from the Ningxia region

| 元素 | 鲜枸杞均值/(mg/kg) | 传统干制枸杞均值/(mg/kg) | 锁鲜干枸杞均值/(mg/kg) |
|---|---|---|---|
| K | 4223 | 20543 | 19500 |
| Na | 839 | 5397 | 1549 |
| Mg | 271 | 1071 | 830 |
| Ca | 113 | 630 | 412 |
| Fe | 10.9 | 66.1 | 30.5 |
| Al | 9.0 | 46.6 | 18.4 |
| Zn | 2.57 | 12.00 | 12.40 |
| B | 2.67 | 9.70 | 6.98 |
| Cu | 2.27 | 8.20 | 7.53 |
| Mn | 2.20 | 9.00 | 7.06 |
| Sr | 2.55 | 6.10 | 2.42 |
| Rb | 0.44 | 3.40 | 2.09 |

## 2.6　食用风险评估结果

假设成人每日分别食用 10、20、30 g 传统干制枸杞, 以世界卫生组织推荐的 Na 日摄入量 2000 mg/d 为其 RfD、欧洲食品安全局 EFSA 建议的 Al 日耐受量 60 kg 体重 8.4 mg/d 为其 RfD。传统干制枸杞 Na 和 Al 的 HQ 和风险级别见表 6。由表 6 可知, 3 个消费水平下 Na 和 Al 的 HQ 值均远小于 1, 整体风险处于可接受水平; 其中 Al 的 HQ 随消费量增加而升高, 在 20 和 30 g/d 时属低风险, 提示长期高消费量下

需关注其累积暴露。

**表 6 传统干制枸杞 Na、Al 食用风险评估表**

**Table 6 Food risks assessment form of Na, Al in traditional dried *Lycium barbarum***

| 消费量/(g/d) | 元素 | 日摄入量/mg | HQ | 风险分级 |
|---|---|---|---|---|
| 10 | Na | 54 | 0.027 | 可忽略 |
| | Al | 0.63 | 0.075 | 可忽略 |
| 20 | Na | 108 | 0.054 | 可忽略 |
| | Al | 1.25 | 0.149 | 低风险 |
| 30 | Na | 162 | 0.081 | 可忽略 |
| | Al | 1.88 | 0.224 | 低风险 |

## 3 结论与讨论

本研究样本前处理采用的微波消解法为密闭式消解，消解能力强、速度快、用酸量较少，优化后的消解程序确保枸杞中糖类等物质完全分解，消解液澄清透明，实现了枸杞的安全高效消解。研究在采用 ICP-MS 测量时，选择碰撞反应池技术校准质谱干扰，采用内标校正非质谱干扰，根据待测元素性质选择内标元素进行优化选择。方法学验证和实际样品测定证实该法准确可靠，完全满足枸杞中常量、微量和痕量无机元素的定量分析。

本研究显示枸杞中存在大量的常量元素 K、Na、Mg、Ca，丰富的必需微量元素 Fe、Zn、Cu、Mn，一定量的非必需元素 Al、B、Sr、Rb。宁夏锁鲜干制枸杞中 12 种常见元素均值为鲜枸杞元素均值的 0.9~4.8 倍。以鲜枸杞含水率 80%计，锁鲜干制枸杞 12 种常见元素富集倍数接近理论脱水倍数。锁鲜工艺通过低温真空升华脱水，可最大限度保留色泽与营养[13]，本研究结果证实了锁鲜工艺在营养保持方面的优势。本研究通过统计分析发现传统干制枸杞 Na、Fe、Al 元素异常升高：传统干制工艺枸杞中的 Na 水平(5397 mg/kg)处于文献报道范围(3800~6200 mg/kg)的中上水平[3,6–8]；传统干制工艺枸杞中的 Al 水平(62.6 mg/kg)与近年报道(35~70 mg/kg)一致[6–8]。但是既往这些研究均采用传统工艺干制，没有与锁鲜干制工艺进行比对分析。本研究中锁鲜干制工艺枸杞中的 Na 水平(1549 mg/kg)、Al 水平(18.4 mg/kg)均显著低于传统干制工艺，进一步证实了锁鲜工艺最大限度的保持了枸杞的营养特色。同时，应该意识到尽管传统干制工艺成本低，但是存在干燥不均匀、易污染等缺陷[14]。需要引起注意的是，本研究中的传统干制枸杞 Na 含量较锁鲜工艺高 248.4%，提示在采用传统工艺干制枸杞过程中存在超限量甚至超范围添加的问题，2024 年央视曝光的“硫超标”枸杞事件也印证了这一推断。

已经证实高钠饮食与心血管代谢疾病高度相关[15–16]。枸杞虽非高钠食品，但作为“养生佳品”常被高频、长期消费。如每日摄入 30 g 干枸杞，则意味着摄入 162 mg Na，相当 0.41 g 食盐 NaCl，对于需要严格限制的高血压患者，这一贡献不可忽视(HQ=0.108)[17]。并且枸杞常与咸味食材(如鸡汤、药膳)配伍，叠加效应可显著增加钠负荷[18]。除了 Na 以外，Al 的过量摄入会损坏神经系统[19]，尽管 Al 的 HQ 显示为低风险，单次暴露并不超标，考虑到 Al 的半衰期长，长期、高频消费则会增加食用风险[20–23]；而且枸杞多糖可促进 Al 在肠道的吸收，应当重视传统干制枸杞中 Al 可能导致的健康危害。老年群体既是枸杞的主要消费者，亦是高血压、糖尿病和肾脏疾病等慢性病的高发群体，建议其在食用中优先选择锁鲜干枸杞，必要时在医师指导下食用[24]。本研究还对不同产区鲜枸杞样品中 12 种主要的无机元素进行了差异性分析，除 Rb 以外的 11 种无机元素均存在统计学差异，提示利用元素“指纹”进行枸杞产地溯源具有可行性[25–30]。

## 参考文献


[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第七卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 15–18.
Chinese Academy of Sciences, Flora Reipublicae Popularis Sinicae Editorial Committee. Flora reipublicae popularis sinicae (Tomus 67, Fasciculus 1) [M]. Beijing: Science Press, 1978: 15–18.

[2] 宋艳梅, 张启立, 崔治家, 等. 枸杞子化学成分和药理作用的研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 华西药学杂志, 2022, 37(2): 206–213.
Song Yanmei, Zhang Qili, Cui Zhijia, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Lycii fructus* and its quality marker prediction and analysis [J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2022, 37(2): 206–213.

[3] Gao Yanjie, Wei Yifo, Wang Yuqing, et al. *Lycium barbarum*: a traditional Chinese herb and a promising anti-aging agent [J]. Aging and Disease, 2017, 8(6): 778–791.

[4] 宁夏回族自治区林业和草原局. 2023 年宁夏枸杞产业发展报告[R]. 银川, 2024.
Ningxia Hui Autonomous Region Forestry and Grassland Bureau. 2023 Ningxia Goji Berry Industry Development Report [R]. Yinchuan, 2024.

[5] 央视财经. 财经调查|央视曝光“硫超标”枸杞！记者直击加工现场：被熏到泪流不止[EB/OL]. (2024-09-01) [2026-07-17]. https://content-static.cctvnews.cctv.com/snow-book/index.html?item_id=12137217060569220758.
CCTV Finance. Financial Investigation: CCTV exposes “sulfur-excessive” goji berries! Reporters visit processing site: choked with tears [EB/OL]. (2024-09-01) [2026-07-17]. https://content-static.cctvnews.cctv.com/snow-book/index.html?item_id=12137217060569220758.

[6] 冯雷, 李雪, 徐万里, 等. 不同盐渍化土壤栽培的黑果枸杞品质评价[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(10): 167–174.
Feng Lei, Li Xue, Xu Wanli, et al. Evaluation of nutritional components of *Lycium ruthenicum* murr. in salinized gradient soils [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(10): 167–174.

[7] 开建荣, 王彩艳, 赵丹青, 等. 红枸杞、黑枸杞和黄枸杞中 49 种无机元素比较研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 152–157.
Kai Jianrong, Wang Caiyan, Zhao Danqing, et al. Comparative study of 49 inorganic elements in red, black and yellow *Lycium barbarum* [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 152–157.

[8] 王梦泽, 王凤忠, 范蓓, 等. 不同产地枸杞子营养品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 307–314.
Wang Mengze, Wang Fengzhong, Fan Bei, et al. Analysis of nutritional quality differences of goji berries from different producing areas [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 307–314.

[9] 刘静, 杨正友, 曹有龙, 等. 不同产地枸杞子矿质元素含量测定及特征分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 1–8.
Liu Jing, Yang Zhengyou, Cao Youlong, et al. Determination and characteristic analysis of mineral elements in *Lycium barbarum* from different producing areas [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 1–8.

[10] 庞靖, 刘峰, 仲娜. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定枸杞中 19 种元素[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(5): 837–838.
Pang Jing, Liu Feng, Zhong Na. Determination of 19 elements in *Lycium barbarum* by ICP-MS using microwave digestion for sample preparation [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2008, 18(5): 837–838.

[11] 开建荣, 李彩虹, 赵丹青, 等. 宁夏不同地区、不同品种枸杞中元素含量差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 257–264.
Kai Jianrong, Li Caihong, Zhao Danqing, et al. Analysis of mineral elements in wolfberry (*Lycium barbarum*) from different regions and varieties [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 257–264.

[12] 张自萍, 廖志良, 郑国琦. 锁鲜枸杞与常规枸杞干果质量差异比较[J]. 食品工业, 2022, 43(8): 156–160.
Zhang Ziping, Liao Zhiliang, Zheng Guoqi. Comparison of quality differences between fresh-locking and conventional dried fruits of *Lycium barbarum* [J]. Food Industry, 2022, 43(8): 156–160.

[13] World Health Organization. Guideline: sodium intake for adults and children [M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2012.

[14] 高月. 枸杞干燥方法及其促干剂的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015: 1–40.
Gao Yue. Study on drying methods and drying accelerator of goji berry [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015: 1–40.

[15] 赵祖桉, 靳亚阁, 仝壮, 等. 全球视角下中国居民缺血性心脏病疾病负担及其影响因素分析[J]. 卫生经济研究, 2025, 42(9): 53–57.
Zhao Zu'an, Jin Yage, Tong Zhuang, et al. Study on the disease burden of ischemic heart disease and its influencing factors among Chinese residents from a global perspective [J]. Health Economics Research, 2025, 42(9): 53–57.

[16] 马陈西南, 乔子钰, 叶美辰, 等. 低钠盐的健康效益、安全性与推广措施[J]. 中国慢性病预防与控制, 2025, 33(4): 313–320.
Ma Chenxinan, Qiao Ziyu, Ye Meichen, et al. Health benefits, safety and popularization measures of low sodium salt [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2025, 33(4): 313–320.

[17] European Food Safety Authority (EFSA). Dietary exposure to aluminium and health risk assessment [J]. EFSA Journal, 2018, 16(11): e05402.

[18] 古海刚, 冯姝, 刘伟伟. 枸杞农药残留及重金属污染物风险评估[J]. 农村科学实验, 2024(6): 70–72.
Gu Haigang, Feng Shu, Liu Weiwei. Risk assessment of pesticide residues and heavy metal contaminants in goji berries [J]. Rural Scientific Experiment, 2024(6): 70–72.

[19] 李玲, 廖明琪, 马海忠, 等. 五合枸杞中 7 种微量营养素含量测定[J]. 中国药师, 2012, 15(9): 1250–1253.
Li Ling, Liao Mingqi, Ma Haizhong, et al. Determination of seven micronutrients in Wuhe wolfberry [J]. China Pharmacist, 2012, 15(9): 1250–1253.

[20] 周喜荣, 张丽萍, 蒋鹏, 等. 宁夏枸杞生育期干物质与氮磷钾积累动态和养分需求规律[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 262–272.
Zhou Xirong, Zhang Liping, Jiang Peng, et al. Dynamics of dry matter and nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation and nutrient requirements in the growing period of Lyceum bararum in Ningxia [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021(1): 262–272.

[21] 贺春燕, 王有科, 齐广平, 等. 氮磷钾配施对景电灌区枸杞生长及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(2): 100–104.
He Chunyan, Wang Youke, Qi Guangping, et al. Effects of different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer to the growth and yield of *Lycium barbarum* in the Jingtai irrigation region [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(2): 100–104.

[22] 王凤忠, 范蓓, 刘静, 等. 枸杞品质评价体系研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 1–12.
Wang Fengzhong, Fan Bei, Liu Jing, et al. Research progress on the quality evaluation system of goji berry *Lycium barbarum* L. [J]. Food Science, 2023, 44(1): 1–12.

[23] Hartung N, Wangorsch G, Huisinga W, et al. Extension and validation of a physiologically based toxicokinetic model for risk assessment of aluminium exposure in humans [J]. Archives of Toxicology, 2025, 99(6): 2379–2395.

[24] 张雪燕, 戴瑜婷, 王艺璇, 等. 枸杞化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(1): 174–183.
Zhang Xueyan, Dai Yuting, Wang Yixuan, et al. Research progress of gouqi(*Lycium barbarum*)and predictive analysis on its Q-markers [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2024, 42(1): 174–183.

[25] 赵镭, 钟葵, 周巍, 等. 食品产地溯源技术研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 384–393.
Zhao Lei, Zhong Kui, Zhou Wei, et al. Research progress on food geographical origin traceability technology [J]. Food Science, 2022, 43(19): 384–393.

[26] 李明, 张华, 王磊. 枸杞加工器具金属迁移研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 45–50.
Li Ming, Zhang Hua, Wang Lei. Study on metal migration in goji berry processing equipment [J]. Food and Machinery, 2023, 39(5): 45–50.

[27] 中国环境监测总站. 2023 年中国生态环境状况公报[R]. 北京, 2024.
China National Environmental Monitoring Centre 2023 China Ecological Environment Status Bulletin [R]. Beijing, 2024.

[28] Klotz K, Weistenhöfer W, Neff F, et al. The health effects of aluminium exposure [J]. Deutsches Ärzteblatt International, 2017, 114(39): 653–659.

[29] 赵丽莉, 李爱华, 辛国省, 等. 微波密闭消解ICP-AES法测定宁夏枸杞中矿物元素[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2648–2650.
Zhao Lili, Li Aihua, Xin Guoxing, et al. Determination of mineral elements in *Lycium barbarum* L. from Ningxia by microwave closed digestion ICP-AES [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 2648–2650.

[30] 黄智安, 余进, 罗欣, 等. 无机元素图谱结合化学计量学在枸杞子产地溯源的应用[J]. 理化检验-化学分册, 2025, 61(9): 1032–1040.
Huang Zhian, Yu Jin, Luo Xin, et al. Application of inorganic element fingerprint combined with chemometrics in geographical origin traceability of *Lycium barbarum* L [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2025, 61(9): 1032–1040.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)