

# 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 法同时测定生物样品中 24 种元素的方法

王刚

(环境应激与慢病防控教育部重点实验室 中国医科大学, 沈阳 110000)

**摘要:** 为了快速、准确地测定生物样品中多元素的含量, 采用湿法消解对尿液、血液和组织进行消解处理, 使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 对生物样品中 Na、Mg、K、Ca 等 24 种元素进行测定。结果表明在优化的实验条件下, 使用内标法可以降低非质谱干扰, 稀释法有助于降低基体效应。24 种元素回归系数 R 均大于 0.9999, 方法检出限为 0.005~0.9  $\mu\text{g/L}$ , 定量限为 0.015~2.7  $\mu\text{g/L}$ 。在 3 个不同浓度下的 RSD 值在 0.5%~5.3%, 3 个添加水平下的回收率在 80.5%~120.7% 之间。已建立的方法具有快速、高效和准确的特点, 适用于生物样品中多元素测定, 对元素的生理功能和毒性研究具有重要意义。

**关键词:** 电感耦合等离子体质谱法; 生物样品; 多元素; 湿法消解

中图分类号: R-331

文献标识码: A

## Simultaneous determination of 24 elements in biological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)

WANG Gang

(Environmental Stress and Chronic Disease Control & Prevention China Medical University, Ministry of  
Education, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** In order to quickly and accurately determine the contents of multiple elements in biological samples, urine, blood and tissues were digested by wet digestion method. 24 elements such as Na, Mg, K and Ca were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that the non-mass spectrum interference and matrix effect can be reduced by internal standard method and dilution method under optimized experimental conditions. The regression coefficients R of the 24 elements were all greater than 0.9999. The limits of detection and quantification were 0.005~0.9  $\mu\text{g/L}$  and 0.015~2.7  $\mu\text{g/L}$  respectively. RSD values at three different concentrations ranged from 0.5% to 5.3%, and the recoveries at three

addition levels ranged from 80.5% to 120.7%. The established method had the characteristics of rapid, efficient and accurate, and was suitable for the determination of multi-element in biological samples, which was of great significance for the study of physiological function and toxicity of elements.

**Keywords:** Inductively coupled plasma mass spectrometry; Biological samples; Multiple elements; Wet digestion

生物样品如尿液、血液和组织样品中的多种元素，在体内发挥着有益或有害的作用。对生物样品中多元素的检测，有利于研究元素的生理功能和毒性效应。生物样品由于其组成较为复杂，含有较高的有机质成分，会造成基体效应干扰较大。部分痕量元素可能由于基体干扰而未被检出，非金属元素灵敏度降低。因此生物样品元素分析在一定程度上取决于样品前处理和仪器分析准确性。

样品分解处理方法主要分为高温炉干法灰化、敞开法湿法消解、高压密闭罐消解和微波消解等 4 种方法，炉干法灰化温度过高会导致样品损失，密闭罐消解和微波消解需要在高压状态下进行，消解效果较好但溶剂消耗量较高，需要加热赶酸步骤，操作繁琐且重复性差。湿法消解操作简便，减少样品量和溶剂量使用，可同多进行多个样品的处理且易挥发性元素损失可控，适合于大量的生物样品的消解处理。目前，ICP-OES 法<sup>[1]</sup>、ICP-AES 法<sup>[2]</sup>和 ICP-MS 法<sup>[3]</sup>可以实现不同样品中多元素的同时测定。但是，ICP-OES 存在仪器耐盐浓度较低，易发生谱线重叠引起误差<sup>[4]</sup>。ICP-AES 法仅适合浓度较低的物质测定，且基质效应影响较大<sup>[5]</sup>。三者中 ICP-MS 因其检出限低、线性范围宽、基质效应影响较小且操作较为简便，适合于不同基质中多元素的同时测定，应用前景最为广阔。ICP-MS 主要由进样系统、离子源和质谱检测器构成。样品经过前处理后以液态形式经雾化器雾化后进入等离子体，经过蒸发、解离、原子化和电离过程后，依据质核比 ( $m/z$ ) 在质量分析器中进行分离。进入质谱中，离子被转换为电子脉冲，脉冲大小与浓度相关，通过标准物质响应相关性分析，实现对样品进行定量分析。

然而，多元素分析多数集中在水样、土壤等环境样品中，对于生物样品多元素检测的报道较为有限。本研究使用湿法消解前处理方法，结合 ICP-MS 仪器分析方法，建立了尿液、血液和组织等生物样品中 24 种元素的测定方法。设置多套标准曲线范围解决生物样品中不同元素含量差异大的问题，且使用内标法辅助测定降低非质谱干扰。已建立的方法具有全面、快速、高效和准确的特点，适用于生物样品中多元素同时测定，对生物材料中多元素测定及

元素生理功能和毒性的进一步研究具有重要意义。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器

7700x 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 美国安捷伦科技有限公司); 干式恒温器 (MK200-4, 杭州奥盛仪器有限公司); 电子天平 (Mettler-Toledo, 梅特勒-托利多公司); Millipore 超纯水机 (美国 Millipore 公司)。

### 1.2 药品、试剂与耗材

硝酸 (优级纯, 上海安谱实验科技股份有限公司); 30%过氧化氢 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

Na (GSB 04-1738-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Mg (GSB 04-1735-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、K (GSB 04-1733-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Ca (GSB 04-1720-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Al (GSB 04-1713-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Cu (GSB 04-1725-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Zn (GSB 04-1761-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Ba (GSB 04-1717-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Fe (GSB 04-1726-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Mn (GSB 04-1736-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、B (GSB 04-1716-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Ag (GSB 04-1713-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、As (GSB 04-1714-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Be (GSB 04-1718, 2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Cr (GSB 04-1723-2004 (a), 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Cd (GSB 04-1721-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Ni (GSB 04-1740-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Pb (GSB 04-1742-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Se (GSB 04-17512004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Sb (GSB 04-1749-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Tl (GBW (E) 082135 (81-1), 100  $\mu\text{g/mL}$ )、Mo (GSB 04-1737-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Sr (GSB 04-1754-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、Li (GSB 04-1734-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ )、北京中科仪友化工技术研究院; 含  $^6\text{Li}$ 、 $^{45}\text{Sc}$ 、 $^{72}\text{Ge}$ 、 $^{115}\text{In}$ 、 $^{208}\text{Bi}$  和  $^{103}\text{Rh}$  混合内标溶液 (100 mg/L, 安捷伦科技有限公司); 含 Ce、Li、Co、Tl 和 Y 的质谱调谐液 (10 mg/L, 安捷伦科技有限公司)。

耐酸耐高温离心管 (15 mL, Biofil 有限公司); 进样管 (Biofil 有限公司); 一次性注射器 (1 mL, 上海凯乐输液器厂); 微孔滤膜 (0.45  $\mu\text{m}$ , 天津津腾科技有限公司)。

### 1.3 标准溶液的配制

1%硝酸溶液: 取 250 mL 容量瓶装入适量超纯水, 取 2.5 mL 硝酸于容量瓶中, 超纯水定容至 250 mL 混匀。

5%硝酸溶液: 取 100 mL 容量瓶装入适量超纯水, 取 5 mL 硝酸于容量瓶中, 超纯水定容至 100 mL 混匀。

内标溶液（1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）：取仪器内标溶液 1 mL 于 100 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀。

标准曲线溶液设置：由于样品中元素含量差异较大，参考国家标准设置 4 套标准曲线，后期依据样品实际情况可合并调整。

标准曲线溶液 1：取上述 Na、Mg、K 和 Ca 混合标准溶液（1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）1 mL 于 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。再分别取 0.05、0.5、1、5 和 10 mL 标准使用溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）于 5 个 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀，分别得到 0.5、5、10、50 和 100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的标准曲线浓度点。

标准曲线溶液 2：取上述 Al、Cu、Zn、Ba 和 Fe（1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）1 mL 于 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。再取上述标准溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）1 mL 于 100 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。分别取 0.05、0.1、0.5、1 和 5 mL 标准使用溶液（1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）于 5 个 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀，分别得到 5、10、50、100 和 500  $\mu\text{g}/\text{L}$  的标准曲线浓度点。

标准曲线溶液 3：取上述 Ag、As、Se、Be、Cr、Cd、Pb、Sb、Tl、B、Mn、Ni 和 Mo（1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）1 mL 于 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。再取上述标准溶液（100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）1 mL 于 100 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。分别取 0.005、0.01、0.1、0.5 和 1 mL 标准使用溶液（1  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）于 5 个 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀，分别得到 0.5、1、10、50 和 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  的标准曲线浓度点。

标准曲线溶液 4：取上述 Li 和 Sr（1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）0.1 mL 于 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀得到标准使用溶液（10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）。分别取 0.05、0.1、0.5、1 和 5 mL 标准使用溶液（10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）于 5 个 10 mL 容量瓶中，使用 1%硝酸溶液定容混匀，分别得到 50、100、500、1000 和 5000  $\mu\text{g}/\text{L}$  的标准曲线浓度点。

#### 1.4 样品前处理

尿液样品：准确量取 0.15~0.25 mL 尿液于 15 mL 离心管中，使用 5% 硝酸稀释至 10 mL，摇匀，溶液过滤膜至进样管，同时做试剂空白实验，等待进样。

血液样品：准确量取 0.15~0.25 mL 血液于 15 mL 离心管中，加入 0.8 mL 硝酸和 0.2 mL 过氧化氢，开盖在干式恒温器中 90°C 加热 1 h，110°C 加热 4 h，小心移出室温放凉，使用超纯水稀释至 10 mL，摇匀，溶液过滤膜至进样管，同时做试剂空白实验，等待进样。

组织样品：准确量取一定质量（小于 0.5 g）的组织样品于 15 mL 离心管中，加入 0.8 mL

硝酸和 0.2 mL 过氧化氢，开盖在干式恒温器中 90°C 加热 1 h，110°C 加热 4 h，小心移出室温放凉，使用超纯水稀释至 10 mL，摇匀，溶液过滤膜至进样管，同时做试剂空白实验，等待进样。

### 1.5 ICP-MS 工作条件

使用标准质谱调谐溶液和内标溶液，考察射频功率、采样深度和雾化器流量等条件对待测元素谱线发射强度的影响。综合考虑所有元素的响应值和稳定性，得到 ICP-MS 的工作参数（表 1）。

表 1 ICP-MS 工作条件

仪器参数	优化值	仪器参数	优化值
等离子气体 (L/min)	15	射频功率 (W)	1550
辅助气体 (L/min)	1	采样深度 (mm)	9
载气 (L/min)	1	雾化器流量 (L/min)	0.98
测定模式	He 碰撞	碰撞气流量 (mL/min)	4.3
补偿/补偿气 (L/min)	1	提升量 (mL/min)	1
雾化室温度 (°C)	2	重复次数	3

### 1.6 内标元素的选择

使用 ICP-MS 进行样品测定时可能会发生质谱和非质谱干扰，使用内标法可以对非质谱干扰进行校正。内标法是在标准溶液和样品中加入一种或几种元素以检测和校准待测元素信号的漂移，并且在一定程度上避免基体效应。本实验采用的仪器使用双蠕动泵模式进样，分别引入待测溶液和含有  $^6\text{Li}$ 、 $^{45}\text{Sc}$ 、 $^{72}\text{Ge}$ 、 $^{115}\text{In}$ 、 $^{208}\text{Bi}$  和  $^{103}\text{Rh}$  等元素的混合内标溶液，元素内标的选择见表 2。在充分混合均匀后进入仪器进行测定，使用内标法可以增加样品测定的准确性。

### 1.7 基体效应干扰校正

生物样品组成复杂，基体干扰较为严重，将仪器调为最佳状态是减少基体干扰的一个关键方法外，还可以通过稀释法进行干扰校正。稀释法主要考虑生物样品中盐含量过高以引起的基体效应（即共存组分对待测组分信号干扰严重），通过稀释样品溶液有效降低溶液盐含量及酸体积，从而减少对仪器测定的干扰。本实验前处理步骤选择的总稀释倍数使得各元素在测定时能够满足要求，检测结果较好。

### 1.8 样品测定

首先对仪器进行样品引入进行维护, 选用 He 碰撞模式进行维护, 使用调谐液进行调节, 保证仪器处于正常状态且各项调谐指标正常。在样品测定时, 在线导入内标溶液, 依据标准曲线溶液的浓度和待测元素与内标的响应比制作标准曲线, 进而对空白溶液和样品进行定量分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 方法学结果

#### 2.1.1 线性、检出限和定量限

分别使用已配置标准曲线溶液, 利用 ICP-MS 在最佳检测条件下进行检测。以浓度为横坐标, 以待测元素与内标的信号响应比值为纵坐标进行线性回归。然后连续测定 21 份样品空白溶液, 以 3 倍浓度值的标准差计算不同元素的检出限 LOD, 以 10 倍浓度值的标准差计算不同元素的定量限 LOQ。结果见表 2, 24 种元素线性关系良好, 相关系数 R 均大于 0.9999, 方法检出限为 0.005~0.9  $\mu\text{g/L}$ , 方法定量限为 0.015~2.7  $\mu\text{g/L}$ 。

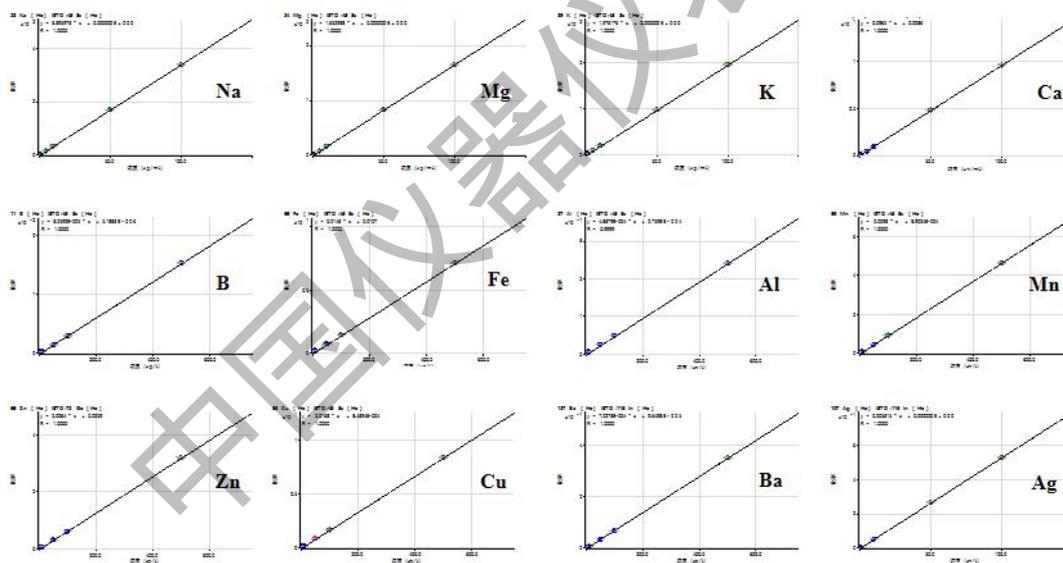
#### 2.1.2 精密度

取低、中、高三个浓度的含有 24 种元素的混合标准溶液, 在最优仪器条件下连续进样测定 6 次, 计算 24 种元素在 3 个不同浓度下的 RSD 值在 0.5%~5.3%, 表明仪器精密度良好。

表 2 24 种元素的线性、相关系数、LOD 和 LOQ

待测元素	内标元素	线性范围 / $\mu\text{g/L}$	线性方程	R	LOD / $\mu\text{g/L}$	LOQ / $\mu\text{g/L}$
$^{23}\text{Na}$	$^{45}\text{Sc}$	0~100000	$y=3.395973x$	1.0000	0.02	0.06
$^{24}\text{Mg}$	$^{45}\text{Sc}$	0~100000	$y=1.652938x$	1.0000	0.4	1.2
$^{39}\text{K}$	$^{45}\text{Sc}$	0~100000	$y=1.976176x$	1.0000	0.03	0.09
$^{44}\text{Ca}$	$^{45}\text{Sc}$	0~100000	$y=0.0965x+0.0036$	1.0000	0.01	0.03
$^{27}\text{Al}$	$^{45}\text{Sc}$	0~500	$y=0.0004x+0.0003$	0.9999	0.4	1.2
$^{65}\text{Cu}$	$^{45}\text{Sc}$	0~500	$y=0.0168x+0.0008$	1.0000	0.07	0.21
$^{66}\text{Zn}$	$^{72}\text{Ge}$	0~500	$y=0.0064x+0.0059$	1.0000	0.1	0.3
$^{56}\text{Fe}$	$^{45}\text{Sc}$	0~500	$y=0.0143x+0.0107$	1.0000	0.2	0.6
$^{137}\text{Ba}$	$^{115}\text{In}$	0~500	$y=0.0007x+0.00005$	1.0000	0.02	0.06
$^{107}\text{Ag}$	$^{115}\text{In}$	0~100	$y=0.005315x$	1.0000	0.02	0.06
$^{75}\text{As}$	$^{72}\text{Ge}$	0~100	$y=0.0042x+0.0004$	1.0000	0.02	0.06
$^9\text{Be}$	$^6\text{Li}$	0~100	$y=0.026806x$	1.0000	0.03	0.09

<sup>52</sup> Cr	<sup>45</sup> Sc	0~100	$y=0.0196x+0.0011$	1,0000	0.09	0.27
<sup>111</sup> Cd	<sup>115</sup> In	0~100	$y=0.0009x$	1.0000	0.02	0.06
<sup>208</sup> Pb	<sup>209</sup> Bi	0~100	$y=0.004175x$	1.0000	0.03	0.09
<sup>78</sup> Se	<sup>72</sup> Ge	0~100	$y=0.0003x$	0.9999	0.3	0.9
<sup>121</sup> Sb	<sup>115</sup> In	0~100	$y=0.002709x+0.0005$	0.9999	0.03	0.03
<sup>205</sup> Tl	<sup>209</sup> Bi	0~100	$y=0.005946x$	1.0000	0.005	0.02
<sup>11</sup> B	<sup>45</sup> Sc	0~100	$y=0.00003x+0.000006$	1.0000	0.8	2.4
<sup>55</sup> Mn	<sup>45</sup> Sc	0~100	$y=0.0093x+0.0009$	1.0000	0.06	0.18
<sup>60</sup> Ni	<sup>45</sup> Sc	0~100	$y=0.0081x+0.0285$	1.0000	0.1	0.3
<sup>95</sup> Mo	<sup>115</sup> In	0~100	$y=0.0015x+0.0002$	1.0000	0.9	2.7
<sup>7</sup> Li	<sup>45</sup> Sc	0~5000	$y=0.00003x+0.0005$	1.0000	2.0	6.0
<sup>88</sup> Sr	<sup>103</sup> Rh	0~5000	$y=0.0011x+0.0001$	1.0000	0.05	0.15



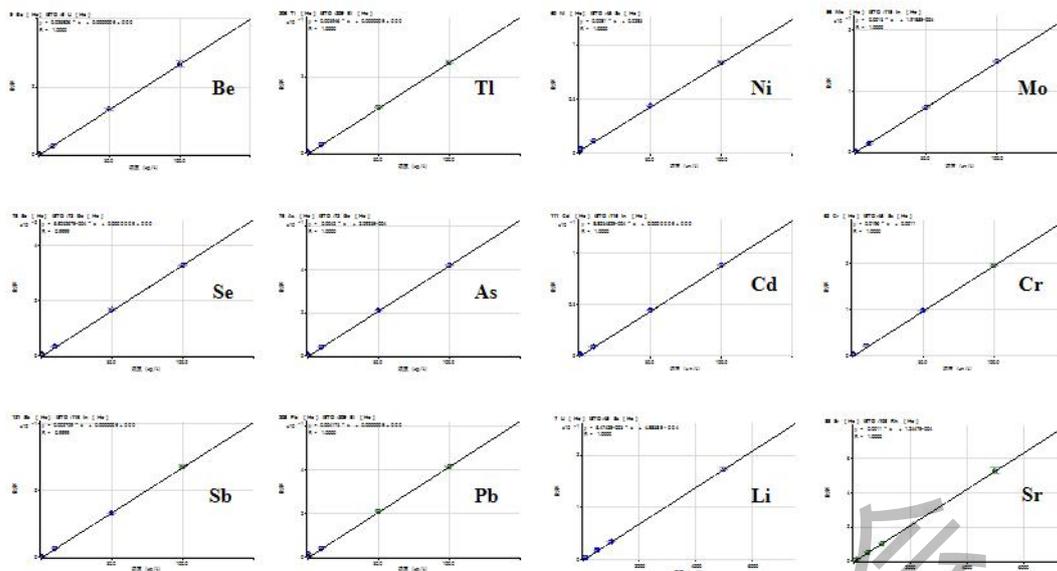


图 1 24 种元素标准曲线图

### 2.1.3 加标回收率

在空白生物样品中加入低、中、高三个标准浓度标准溶液，Na、Mg、K、Ca 加标量为 0.01、5 和 50  $\mu\text{g/mL}$ ，Al、Cu、Zn、Fe、Ba、B 和 Mn 加标量为 1、10 和 100  $\mu\text{g/L}$ ，Li 和 Sr 加标量为 5、100 和 1000  $\mu\text{g/L}$ ，其余元素加标量为 0.5、10 和 50  $\mu\text{g/L}$ 。在最优前处理方法和最优仪器条件下对加标样品进行分析，每个加标水平进行 3 次重复试验，计算加标回收率。由表 3 可知 24 种元素在 3 个添加水平下的回收率在 80.5%~120.7%，该方法对 24 种元素的检测具有良好的准确性。

表 3 精密度和加标回收率

元素名称	精密度浓度 ( $\mu\text{g/L}$ )	RSD/%	标准品加入量 ( $\mu\text{g/L}$ )	回收率/%
Na	500	1.6	10	80.5
	10000	1.8	5000	102.6
	50000	2.1	50000	93.0
Mg	500	1.9	10	113.1
	10000	2.0	5000	101.9
	50000	2.3	50000	92.5
K	500	2.1	10	108.0
	10000	2.1	5000	97.8
	50000	2.4	50000	91.7

	500	3.0	10	103.5
Ca	10000	2.2	5000	98.1
	50000	1.7	50000	90.9
	5	2.2	1	116.0
Al	50	4.7	10	102.2
	100	2.7	100	118.7
	5	3.0	1	81.0
Cu	50	4.0	10	101.2
	100	2.5	100	121.3
	5	3.3	1	95.4
Zn	50	3.9	10	98.5
	100	2.4	100	119.3
	5	3.3	1	100.9
Fe	50	4.4	10	94.5
	100	2.4	100	113.1
	5	3.2	1	96.0
Ba	50	3.9	10	94.8
	100	2.4	100	115.0
	0.5	5.3	0.5	111.7
Ag	10	0.7	10	102.6
	50	1.1	50	103.3
	0.5	1.6	0.5	84.2
As	10	0.5	10	90.2
	50	0.9	50	100.1
	0.5	4.6	0.5	103.3
Be	10	2.8	10	96.9
	50	1.6	50	106.3
	0.5	1.5	0.5	86.6
Cd	10	0.6	10	98.5

	50	1.0	50	101.7
	0.5	2.6	0.5	98.1
Pb	10	0.5	10	95.0
	50	1.3	50	90.4
	0.5	3.1	0.5	82.5
Se	10	2.6	10	102.6
	50	1.8	50	103.3
	0.5	1.8	0.5	86.2
Sb	10	0.6	10	93.3
	50	0.9	50	98.3
	0.5	1.4	0.5	96.6
Tl	10	0.8	10	92.9
	50	1.1	50	89.9
	5	2.3	1	80.6
B	50	5.7	10	82.4
	100	2.1	100	115.3
	5	3.1	1	98.2
Mn	50	4.0	10	98.5
	100	2.3	100	120.7
	0.5	4.9	0.5	81.2
Ni	10	0.9	10	98.1
	50	1.2	50	101.9
	0.5	1.5	0.5	90.2
Mo	10	2.7	10	85.3
	50	2.4	50	85.2
	0.5	4.1	0.5	100.2
Cr	10	2.5	10	105.5
	50	0.9	50	111.3
Li	50	3.3	5	101.7

	500	0.7	100	94.3
	1000	1.4	1000	95.5
	50	0.9	5	83.9
Sr	500	0.5	100	93.6
	1000	0.9	1000	91.1

### 3 结论

本研究建立了生物样品前处理方法和 ICP-MS 同时检测生物样品 24 种无机元素的仪器分析方法。已建立的前处理和仪器分析方法具有操作较为简单、实验安全性较高、前处理效果较好、基体效应干扰低和分析准确性高等优点,可满足生物样品中多元素快速、准确测定的需求,对生物材料中多元素测定及元素生理功能的研究具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 王文芳,汪永顺.混合酸溶-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法同时测定多金属矿石中铜铅锌钼[J].中国无机分析化学,2023,13(3):256-262.
- [2] 张丽萍,孙启亮,姚明星,等.偏硼酸锂-四硼酸锂熔融-电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定石膏中多组分含量[J].中国无机分析化学,2023,13(7):741-747.
- [3] 马兴,赵婷,郑璇,等.微波消解-ICP-MS 同时测定宠物食品中13种元素[J].中国饲料,2016(21):30-32.
- [4] 刘育金,李春雷,孟强.含铝食品添加剂及其检测技术与监测分析的研究进展[J].食品工业科技,2023,44(07):470-476.
- [5] 周瑾艳,保志娟,杨亦,等.生物体中重金属元素分析方法的研究进展[J].中国测试,2012,38(1):56-59.