

# 电感耦合等离子体质谱法测定豆制品中铝含量的 不确定度评定及方法改进

黄 珊\*, 刘 越

(河南省口岸食品检验检测所, 郑州 450002)

**摘 要: 目的** 对微波消解-电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定豆制品铝含量中可能引入的不确定度进行分析和评定。**方法** 根据 CNAS-CL01-G003: 2019 对测定不确定度的相关要求, 建立了不确定度评定的数学模型, 分析不确定度的主要来源, 并将各分量进行合成。**结果** 当铝含量为 39.56 mg/kg 时, 扩展不确定度为 2.02 mg/kg( $k=2$ )。针对引起测定不确定度的主要贡献者, 通过几种改变测量方法的途径, 使其中 3 个主要分量分别从 0.019662、0.002046、0.00274 下降为 0.010085、0.001520、0.00166。**结论** 改进方法效果显著, 达到了降低影响结果准确性因素的目的。

**关键词:** 不确定度; 电感耦合等离子体质谱法; 豆制品; 铝; 方法改进

## Evaluation and improvement of uncertainty in determination of aluminum in soy products by inductively coupled plasma mass spectrometry

HUANG Shan\*, LIU Yue

(Henan Port Food Inspection and Testing Institute, Zhengzhou 450002, China)

**ABSTRACT: Objective** To analysis and evaluate the uncertainty in the determination of the aluminum content in soybean products by microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). **Methods** According to the relevant requirements of CNAS-CL01-G 003: 2019 for measuring uncertainty, a mathematical model for uncertainty assessment was established, the main sources of uncertainty were analyzed, and the components were synthesized. **Results** When the aluminum content was 39.56 mg/kg, the expanded uncertainty was 2.02 mg/kg ( $k=2$ ). For the main contributors that caused measurement uncertainty, three of the main components were reduced from 0.019662, 0.002046, 0.00274 to 0.010085, 0.001520, 0.00166 through several ways to change the measurement method. **Conclusion** The effect of the improved method is significant, which achieves the purpose of reducing the factors that affect the accuracy of the results.

**KEY WORDS:** uncertainty; inductively coupled plasma mass spectrometry; soybean products; aluminum; method improvement

基金项目: 国家自然科学基金项目(21577042)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21577042)

\*通讯作者: 黄珊, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 28074432@qq.com

\*Corresponding author: HUANG Shan, Associate Professor, Henan Port Food Inspection and Testing Institute, No. 8, Jinger Road, Jinshui District, Zhengzhou 450002, China. E-mail: 28074432@qq.com

## 1 引言

豆及豆制品是我国百姓膳食中比较普遍的食物, 因其物美价廉, 富含蛋白质、脂肪、维生素和微量元素而深受广大消费者的喜爱。在生产过程中, 多添加食品添加剂硫酸铝钾(又名钾明矾)或硫酸铝铵(又名铵明矾), 作为大豆制品的稳定剂或膨松剂。这 2 种食品添加剂的主要成分均为铝, 近年来研究表明长期摄入过量的含铝添加剂的食品可能导致退化性痴呆、消化功能障碍、佝偻病、骨软化症、慢性肾功能衰竭等<sup>[1,2]</sup>。GB 2760-2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定豆类制品中铝的残留量 $\leq 100$  mg/kg(干样品, 以 Al 计)<sup>[3]</sup>。

测量不确定度是根据所用到的信息表征赋予被测量值分散性的非负参数, 其与测量结果相联系<sup>[4]</sup>, 是反映检测结果可比性和可接受性的关键指标。豆制品中铝测量方法的不确定度评定对提高豆制品安全性评价具有实际意义, 目前尚未见关于豆制品中铝含量测定不确定度的研究报道。本文采用 GB 5009.182-2017<sup>[5]</sup>中电感耦合等离子质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定豆制品中铝的含量, 以技术文本 JJF 1059.1-2012《测定不确定度的评定与表示》<sup>[6]</sup>、CNAS-GL06: 2019《化学分析中不确定度的评估指南》<sup>[7]</sup>中规定的方法为依据建立测量模型探究各来源不确定度的分量, 以此确定影响豆制品中铝含量测量不确定度的主要因素及其贡献度<sup>[8-11]</sup>, 并探索减少测量不确定度的方法<sup>[12-15]</sup>, 为有效地控制用 ICP-MS 法测定豆制品中铝含量的质量风险提供依据, 为提高分析检测工作准确性提供技术参考。

## 2 材料与方 法

### 2.1 试剂、材料

65%硝酸(优级纯, 美国默克公司); 铝标准溶液(GSB 04-1713-2004, 1000  $\mu\text{g/mL}$ , 国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

4 种市售豆制品: 豆腐、腐竹、豆干、千张(河南市场随机抽取)。

### 2.2 仪器与设备

iCAPQ 电感耦合等离子质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); MARS6 微波消解仪(美国 CEM 公司); Eppendorf 移液器(100 ~ 1000  $\mu\text{L}$ , 艾本得中国有限公司)。

### 2.3 实验方法

#### 2.3.1 样品前处理

前述 4 份豆制品样品粉碎均匀后 85  $^{\circ}\text{C}$  恒温干燥 4 h, 干燥后随即再粉碎过筛(1 mm 筛), 称取 0.3 g(精确至 0.0001 g)用聚四氟乙烯初步消解后加入 7 mL 65%硝酸进

行微波消解, 消解程序为: 10 min 加热至 120  $^{\circ}\text{C}$  保持温度 5 min, 再 5 min 加热至 150  $^{\circ}\text{C}$  保持温度 5 min; 最后 5 min 加热至 180  $^{\circ}\text{C}$  保持温度 30 min。冷却至室温后用 120  $^{\circ}\text{C}$  赶酸仪处理多余硝酸, 至样品剩余 1 ~ 2 mL 时, 冷却并转移至 50 mL 容量瓶中定容待测, 同时做空白实验。

#### 2.3.2 ICP-MS 工作参数

RF 功率: 1550 W; 矩管冷却气流量: 14 L/min; 辅助气流量: 0.8 L/min; 雾化器流量: 1.114 L/min; 采样深度: 5 mm; 重复次数: 3; 采集模式: 跳峰; 雾化室温度: 2.7  $^{\circ}\text{C}$ 。

#### 2.3.3 标准曲线制作

标准储备液配制: 用刻度吸管吸取铝标准溶液 10 mL 于 100 mL 容量瓶中, 用 2% 的硝酸定容制得铝标准储备液(浓度为 100  $\mu\text{g/mL}$ )。

标准系列溶液配制: 取铝标准储备液 6 份(梯度为: 0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL)于 100 mL 容量瓶中, 用 2% 硝酸定容后配制成 6 份铝标准溶液(浓度梯度为 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0  $\mu\text{g/mL}$ )。采用电感耦合等离子体质谱仪绘制标准曲线(横坐标为标准溶液中铝浓度, 纵坐标为其分析谱线强度响应值)。

#### 2.3.4 试样的测定

用电感耦合等离子体质谱仪对空白溶液和试样溶液进样分析, 根据标准曲线得到消解液中铝的浓度。

#### 2.3.5 建立数学模型

根据 GB 5009.182-2017 第二法建立豆制品中铝含量计算模型为:

$$X = \frac{(c_1 - c_0) \times V \times 1000}{m \times 1000}$$

式中:  $X$  为豆制品中铝的含量, mg/kg;  $C_1$  和  $C_0$  分别代表工作曲线上样品消解液和空白溶液中铝的质量浓度,  $\mu\text{g/mL}$ ;  $V$  为样品定容体积, mL;  $m$  为样品质量, g。

## 3 结果与分析

### 3.1 不确定度来源分析

作为主要来源的不确定度分量主要有 6 类: 标准物质来源(包括铝标准溶液的不确定度、标准系列溶液配制的不确定度)、样品称量来源、样品消解过程来源、样品定容过程来源、标准曲线拟合来源和样品测定重复性来源, 以上 5 个分量均可引入不确定度, 详见图 1。

### 3.2 不确定度分量计算

#### 3.2.1 样品称量过程中引入的不确定度

以电子分析天平检定证书标示的结果为依据值确定不确定度。

天平偏载: 采用 B 类方法评定, 最大允许误差 $\pm 0.001$  g, 概率按矩形分布均匀, 取  $k = \sqrt{3}$ , 计算标准不确定度为  $u_1(M) = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00058$  g 天平重复性: 采用 B 类方法评定, 最大允许误差 $\pm 0.0001$  g, 概率按矩形分布均匀, 取  $k = \sqrt{3}$ , 计算标准不确定度为  $u_2(M) = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} = 0.000058$  g。

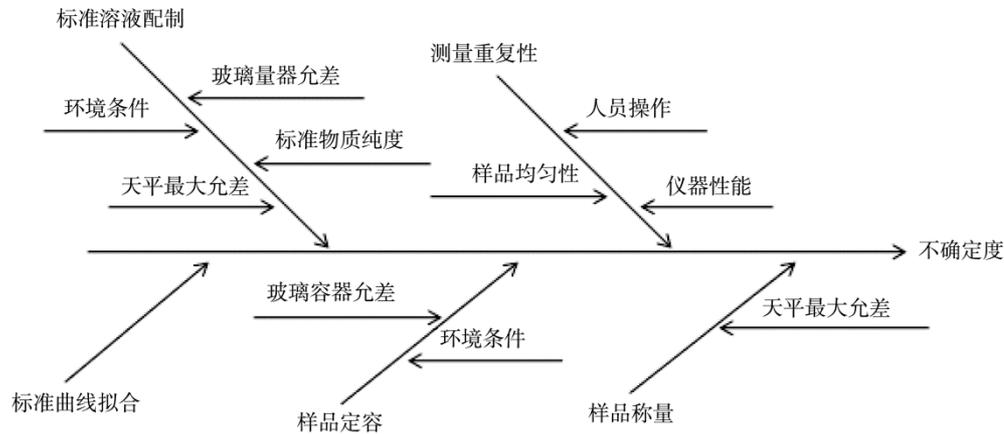


图 1 不确定度来源

Fig.1 Sources of uncertainty

天平示值: 采用 B 类方法评定, 当称量范围为  $0 \leq m \leq 50$  g 时, 最大允许误差  $\pm 0.0002$  g, 概率按矩形分布均匀, 取  $k = \sqrt{3}$ , 计算标准不确定度为  $u_3(M) = \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.00012$  g。

据上, 则称量 0.3032 g 样品引入的相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(M) = \frac{\sqrt{u_1(M)^2 + u_2(M)^2 + u_3(M)^2}}{M} = \frac{\sqrt{0.00058^2 + 0.00058^2 + 0.00012^2}}{0.3032} = 0.00274$$

### 3.2.2 样品定容过程中引入的不确定度

采用 B 类方法评定, 依据 JJG 196-2006《常用玻璃量器》<sup>[16]</sup> 计算相对不确定度(见表 1)。使用 50 mL 容量瓶对样品定容后引入的相对不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(V) = u_{\text{rel}}(V_{50\text{容}}) = 0.000837$$

### 3.2.3 标准溶液引入的不确定度

#### 3.2.3.1 铝标准溶液

以铝标准溶液证书标示信息为依据, 相对扩展不确定度为 0.7%(包含因子  $k=2$ ), 据此计算相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(\text{铝}) = \frac{0.007}{2} = 0.0035$$

#### 3.2.3.2 标准系列溶液配制过程中引入的不确定度

采用逐级稀释方法将标准储备液配制标准系列, 操作中涉及使用的移液管、移液器、容量瓶均为 A 级, 分别计算各使用量具的相对标准不确定度(见表 1), 10 mL 单线移液管 1 次配制成中间储备液, 定容至 100 mL, 用 1000  $\mu\text{L}$  移液器分别取中间储备液 0.20、0.40、0.60、0.80 和 1.00 mL 至 100 mL, 共使用 100 mL 容量瓶 6 次, 由配制过程引入的标准不确定度为综合, 计算配制标准溶液引入的相对标准不确定度为:

表 1 测定过程中容量器具引入的相对标准不确定度

Table 1 Relative standard uncertainty introduced by the capacity appliance during the measurement

规格	引入体积 /mL	20 °C 允差 /mL	K 值(矩形分布)	体积标准不确定度 $u(X_{\text{体}})$ /mL	温度标准不确定度 $u(X_{\text{温}})$ /mL (20±5) °C	相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(X)$
1000 $\mu\text{L}$ 移液器	0.20	0.02	$\sqrt{3}$	0.00231	0.000121	0.011560
1000 $\mu\text{L}$ 移液器	0.40	0.02	$\sqrt{3}$	0.00462	0.000242	0.011562
1000 $\mu\text{L}$ 移液器	0.60	0.10	$\sqrt{3}$	0.00346	0.000364	0.005805
1000 $\mu\text{L}$ 移液器	0.80	0.10	$\sqrt{3}$	0.00462	0.000485	0.005805
1000 $\mu\text{L}$ 移液器	1.00	0.10	$\sqrt{3}$	0.00577	0.000606	0.005806
10 mL 单线移液管	10	0.02	$\sqrt{3}$	0.0116	0.0061	0.001304
50 mL 容量瓶	50	0.05	$\sqrt{3}$	0.0289	0.0303	0.000837
100 mL 容量瓶	100	0.10	$\sqrt{3}$	0.0577	0.0606	0.000837

注:  $u(X_{\text{体}}) = \frac{\text{允差}}{\sqrt{3}}$ ;  $u(X_{\text{温}}) = \frac{V \times 2.1 \times 10^{-4} \times 5}{\sqrt{3}}$ ;  $u_{\text{rel}}(X) = \frac{\sqrt{u(X_{\text{体}})^2 + u(X_{\text{温}})^2}}{V}$

$$u_{rel} = \sqrt{\frac{u_{rel}(\text{铝})^2 + u_{rel}(\text{管})^2 + u_{rel}(\text{瓶})^2 + u_{rel}(0.20)^2}{u_{rel}(0.40)^2 + u_{rel}(0.60)^2 + u_{rel}(0.80)^2 + u_{rel}(1.00)^2}}$$

$$= 0.019\ 662$$

3.2.4 标准曲线拟合引入的不确定度

以每个点测 3 平行的方式测定标准系列溶液 6 个点, 结果如表 2, 根据平均响应值进行拟合, 得  $Y=358741C-1247$ ,  $r=0.9999$ 。

计算拟合曲线残余标准差为:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2}{n-2}} = 5370.83$$

式中:  $Y_i$  表示标准溶液任意浓度下的响应值,  $Y$  表示与  $Y_i$  相对应浓度下的曲线模拟响应值,  $n$  表示总测定次数(此次  $n=3 \times 6=18$ )。

计算标准曲线拟合引起的标准不确定度为:

$$u(Y) = \frac{S_y}{b} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{p} + \frac{(\bar{C}_{\text{样}} - \bar{C}_{\text{标}})^2}{\sum (C_{\text{标}i} - \bar{C}_{\text{标}})^2}} = 0.003\ 793$$

式中:  $n$  表示样品的测定次数,  $\bar{C}_{\text{样}}$  表示样品消解液中铝平均浓度,  $\bar{C}_{\text{标}} = (0 + 0.2 + 0.4 + 0.6 + 0.8 + 1.0) \div 6 = 0.500$ , 表示标准溶液浓度平均值, 斜率为  $b=358741$ ,  $C_{\text{标}i}$  为标准溶液的各浓度值。

据此, 计算标准曲线拟合引起的相对标准不确定度为:

$$u_{rel}(Y) = \frac{u(Y)}{\bar{C}_{\text{样}}} = 0.015\ 90$$

3.2.5 样品重复测定引入的不确定度

重复 11 次对样品进行测定, 根据拟合后的标准曲线计算消解液中铝浓度, 结合数学模型计算出 11 样品中铝含量于表 3。

表 2 标准系列溶液测定结果  
Table 2 Measurement results of standard series solutions

浓度 $C_{\text{标}}/(\text{mg/L})$	响应值 $Y_i$	平均响应值 $\bar{Y}$	曲线模拟响应值 $Y$	$(Y_i - Y)^2$	$(C_{\text{标}i} - \bar{C}_{\text{标}})^2$
0.0	540.2	541.2	-1247	$31.94 \times 10^5$	$25.00 \times 10^{-2}$
	539.8			$31.93 \times 10^5$	
	543.6			$32.06 \times 10^5$	
0.2	70274.2	70314.9	70501.2	$0.5153 \times 10^5$	$9.031 \times 10^{-2}$
	70345.3			$0.2430 \times 10^5$	
	70325.1			$0.3101 \times 10^5$	
0.4	144921.6	145162.6	142249.4	$71.41 \times 10^5$	$0.8442 \times 10^{-2}$
	146210.9			$156.9 \times 10^5$	
	144355.4			$44.35 \times 10^5$	
0.6	215074.5	215188.0	213997.6	$11.60 \times 10^5$	$1.068 \times 10^{-2}$
	213647.6			$1.225 \times 10^5$	
	216842.0			$80.91 \times 10^5$	
0.8	299152.9	297339.1	285745.8	$179.8 \times 10^6$	$11.04 \times 10^{-2}$
	297041.8			$127.6 \times 10^6$	
	295822.7			$101.5 \times 10^6$	
1.0	359872.4	357945.3	357494.0	$56.57 \times 10^5$	$25.13 \times 10^{-2}$
	356741.2			$5.667 \times 10^5$	
	357222.3			$0.7383 \times 10^5$	
				$461.5 \times 10^6$	
					$72.11 \times 10^{-2}$

$$\frac{\sum (Y_i - Y)^2}{\sum (C_{\text{标}i} - \bar{C}_{\text{标}})^2}$$

计算样品中铝含量标准偏差为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = 0.2685$$

计算平行的测定标准不确定度为:

$$u(X) = \frac{S}{\sqrt{n}} = 0.0810$$

样品重复性测定引入的相对标准不确定度:

$$u_{\text{rel}}(X) = \frac{u(X)}{\bar{X}} = 0.002046$$

表 3 样品中铝含量的测定结果

Table 3 Determination results of aluminum content in samples

样品质量 /g	响应值	消解液中铝的浓度 / (mg/L)	铝含量 / (mg/kg)
0.3025	84437.3354	0.2388	39.4789
0.2974	85110.1013	0.2407	40.4712
0.2958	83166.2522	0.2353	39.7742
0.3022	85002.8284	0.2404	39.7789
0.3102	85609.2909	0.2421	39.0255
0.3061	84847.6009	0.2400	39.2014
0.2998	83524.3449	0.2363	39.4100
0.3041	84347.4762	0.2386	39.2300
0.3008	85771.2695	0.2426	40.3201
0.2985	82269.2436	0.2328	38.9956
0.2977	83168.2802	0.2353	39.5213

### 3.3 相对合成标准不确定度与扩展不确定度

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_{\text{rel}}(M)^2 + u_{\text{rel}}(V)^2 + u_{\text{rel}}(\text{标})^2 + u_{\text{rel}}(Y)^2 + u_{\text{rel}}(X)^2} = 0.02553$$

重复测定样品 11 次后, 计算样品中铝平均含量:  $\bar{X} = 39.5643 \text{ mg/kg}$ , 计算合成标准不确定度:  $u = u_{\text{rel}} \times \bar{X} = 0.02553 \times 39.5643 = 1.01008 \text{ mg/kg}$ 。选取扩展因子为  $k = 2$ , 计算扩展不确定度:  $U = 1.01008 \times 2 = 2.020 \text{ mg/kg}$ 。

据此, 微波消解-电感耦合等离子体质谱法下测定出的豆制品中铝含量结果表示为:

$$X = (39.56 \pm 2.02) \text{ mg/kg} (k = 2)。$$

### 3.4 讨论

根据测定及计算结果显示, 利用 ICP-MS 测定豆制品中铝含量, 影响结果不确定度的因素按作用强度高依次: 标准溶液因素 > 标准曲线拟合因素度 > 样品称量过程因素 > 样品重复测定过程因素 > 样品定容过程因素。通过

针对性改进, 得出降低不确定度分量的有效措施如下:

#### 3.4.1 标准溶液配制优化

移液器是配置标准溶液中的主要操作仪器, 移液器作为不确定度的主要来源主要原因在于同一移液器容量允许误差受移取体积变化的影响, 具体表现为: 移取体积数值与操作所产生的相对标准不确定度呈负相关。基于此, 具体操作过程中应尽可能移取较大体积的溶液。另外, 根据 JJG 646-2006<sup>[17]</sup>和 JJG 196-2006 两个技术文本的对比发现, 单标吸量管在移取相同体积液体时在容量允差上低于移液器。据此, 在标准溶液配置中改用单标吸量管操作有助于降低不确定度。

优化后配制标准溶液方法如下: 采用单标刻度吸管作为移液主操作工具, 吸铝标准溶液 1.0 mL 于 100 mL 容量瓶中定容(2%硝酸)得 10  $\mu\text{g/mL}$  铝标准储备液。采用单标刻度吸量管操作按 0.00、2.00、4.00、6.00、8.00、10.00 mL 的梯度取铝标准储备液于 6 个 100 mL 容量瓶中定容(2%硝酸)制得 6 个浓度铝标准溶液(0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0  $\mu\text{g/mL}$ )。根据 2.1.4 数学模型得出优化后由配制引入的相对标准不确定度  $u_{\text{rel}}(\text{标})$  由之前的 0.019662 下降为 0.010085, 差别显著。

#### 3.4.2 标准溶液浓度优化

根据标准曲线拟合引起的相对标准不确定度计算公式可知, 标准溶液同样品溶液平均浓度差越小, 测定次数越多, 测得的相对标准不确定度越小。由此可知, 使标准溶液均值尽可能同样品溶液浓度接近并增加重复测定次数对降低不确定度有积极贡献。

#### 3.4.3 样品称量优化

根据计算公式, 称量质量为称量过程不确定度衡量的唯一变量且适当增加称样质量对降低相对标准不确定度有较为显著影响。从实验数据来看, 当样品称量质量增加到 0.5000 g 后, 相对标准不确定度降低为 0.00166, 较原来的 0.00274 差别显著。因此, 在保证消解完全的前提下尽量增加样品称样量( $\leq 1.0 \text{ g}$ ), 是有效降低样品称量过程中不确定度的有效方法。

#### 3.4.4 样品测量次数优化

参考 3.2.5 中样品重复性测定引入的相对标准不确定度计算公式可知, 同一样品重复测定次数的增加对相对标准不确定度降低有优化作用。实验数据显示重复测量次数增至 20 次(在所测数据分散性和平均值不变的前提下)后, 相对标准不确定度  $u_{\text{rel}}(X)$  由原始的 0.002046 降低到 0.001520, 有显著性。据此, 样品测量重复次数增加对测量不确定度的降低有正向作用。

## 4 结论与讨论

本研究对测定方法不确定度进行评价, 以 ICP-MS 法测定豆制品中铝含量为例, 分析了不确定度的主要来源并

进行了分量合成, 结果显示: 当样品中铝含量为 39.56 mg/kg 时, 扩展不确定度为 2.02 mg/kg ( $k=2$ )。以数值大小排序, 实验中测量不确定度主要来源按贡献大小排序为: 标准溶液配制因素 > 标准曲线拟合因素 > 样品称量因素 > 样品重复测定因素 > 样品定容因素。依据相关计算依据及对实验操作过程中关键性步骤的分析, 本研究认为可从标准溶液配制优化、被测物质转移次数减少、样品测量次数增加、标准溶液与样品溶液平均浓度差减小、样品称量质量在完全消解前提下适当增加等将有利于测量不确定度的增加, 实验显示采用优化操作后, 3 个不确定度的主要分量分别从(0.019662、0.002046、0.00274)下降为(0.010085、0.001520、0.00166), 具有显著性, 有效降低了不确定度, 使检测结果更接近真值。

### 参考文献

- [1] 颜世铭, 洪昭毅, 李增禧. 实用元素医学[M]. 郑州: 河南医科大学出版社, 1999.  
Yan SM, Hong ZY, Li ZX. Practical element medicine [M]. Zhengzhou: Henan Medical University Press, 1999.
- [2] 符克军, 曹光辉, 徐艳钢, 等. 人体生命元素[M]. 北京, 中国医药科学技术出版社, 1995.  
Fu KJ, Cao GH, Xu YG, *et al.* Human life elements [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 1995.
- [3] GB 2760-2014 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S].  
GB 2760-2014 National food safety standard-Standard for use of food additives [S].
- [4] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].  
JJF 1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S].
- [5] GB 5009.182-2017 食品安全国家标准 食品中铝的测定[S].  
GB 5009.182-2017 National standard of food safety-Determination of aluminum in foods [S].
- [6] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].  
JJF 1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S].
- [7] CNAS-GL 06: 2019 化学分析中不确定度的评估指南[S].  
CNAS-GL 06: 2019 Guidance on evaluating the uncertainty in chemical analysis [S].
- [8] 唐磊, 匡必玲. 电感耦合等离子体发射光谱法测定茶叶中铝含量的不确定度分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2252-2256.  
Tang L, Kuang BL. Uncertainty analysis of the determination of aluminum content in tea by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(7): 2252-2256.
- [9] 祝红蕾, 宋永庆. ICP-MS 法测定粉条中铝含量的不确定度评定[J]. 安徽化工, 2019, 45(2): 117-119.  
Zhu HL, Song YQ. Uncertainty evaluation of aluminum content in vermicelli by ICP-MS method [J]. Anhui Chem Ind, 2019, 45(2): 117-119.
- [10] 刘虹涛, 周春梅. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)检测粉条中铝含量不确定度评价[J]. 农业与技术, 2019, 39(20): 17-20.  
Liu HT, Zhou CM. Evaluation of the uncertainty of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) detection of aluminum content in vermicelli [J]. Agric Technol, 2019, 39(20): 17-20.
- [11] 刘钢, 谭阳, 葛城, 等. 电感耦合等离子体质谱测定婴幼儿配方乳粉中铝的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(14): 3829-3834.  
Liu G, Tan Y, Ge C, *et al.* Uncertainty evaluation of determination of aluminum in infant formula milk powder by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(14): 3829-3834.
- [12] 徐冲. 电感耦合等离子体发射光谱法测定面制品中铝含量的不确定度评定及方法改进[J]. 现代面粉工业, 2020, 34(1): 56.  
Xu C. Uncertainty evaluation and method improvement of inductively coupled plasma emission spectrometry for the determination of aluminum content in noodle products [J]. Mod Flour Ind, 2020, 34(1): 56.
- [13] 盖丽娜, 马晓博, 毛琰. 糕点中铝含量的不确定度评定[J]. 现代食品, 2019, (1): 89-94.  
Gai LN, Ma XB, Mao L. Uncertainty evaluation of aluminum content in pastry [J]. Mod Food, 2019, (1): 89-94.
- [14] 许瑞清, 孙丽萍, 刘建春, 等. ICP-MS 测定粉条中铝残留量的不确定度分析[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(12): 55-57.  
Xu RQ, Sun LP, Liu JC, *et al.* Uncertainty analysis of ICP-MS determination of aluminum residue in vermicelli [J]. Food Sci Tech Econ, 2018, 43(12): 55-57.
- [15] 徐冲, 赵立琴, 李玉丹, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定面制品中铝含量的不确定度评定及方法改进[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(11): 120-127.  
Xu C, Zhao LQ, Li YD, *et al.* Uncertainty evaluation and method improvement for the determination of aluminum content in noodle products by inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2019, 34(11): 120-127.
- [16] JJG 196-2006 常用玻璃量器[S].  
JJG 196-2006 Working glass container [S].
- [17] JJG 646-2006 移液器[S].  
JJG 646-2006 Locomotive pipette [S].

(责任编辑: 于梦娇)

### 作者简介



黄 姍, 副教授, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: 28074432@qq.com