

# 电感耦合等离子体质谱法测定莲藕中的 铅、镉、铬、砷和汞

代华均<sup>1\*</sup>, 吴青菊<sup>2</sup>, 庄晓洪<sup>1</sup>, 尹庆红<sup>1</sup>, 祝秀江<sup>1</sup>, 项怡<sup>1</sup>

(1. 成都市食品药品检验研究院, 成都 610045; 2. 成都东方凯特瑞环保催化剂有限责任公司, 成都 610045)

**摘要:** **目的** 建立电感耦合等离子体质谱法同时测定莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞含量的分析方法。**方法** 样品经微波消解后, 以<sup>209</sup>Bi、<sup>115</sup>In、<sup>72</sup>Ge内标溶液消除非质谱干扰, 以氦气为碰撞反应气消除质谱干扰。采用基准物质大米粉 GBW(E)100348、菠菜 GBW10015 和加标回收率验证方法的准确度。对方法的线性范围、检出限、精密度和回收率等进行了考察。**结果** 铅、镉、铬、砷和汞 5 种元素的线性范围分别为 0~50、0~50、0~50、0~50 和 0~2 μg/L; 相关系数 *r* 分别为 0.9996、0.9996、0.9991、0.9997 和 0.9990; 平均加标回收率分别为 97.3%、97.5%、95.7%、96.0% 和 97.4%; 相对标准偏差分别为 0.37%、0.89%、1.04%、1.03%、1.58%; 检出限分别为 0.001、0.002、0.002、0.001 和 0.0003 mg/kg。**结论** 该方法操作简便, 干扰较小, 灵敏度高, 同时检出限低、精密度高、准确度好, 适用于同时检测莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞。

**关键词:** 微波消解; 电感耦合等离子体质谱法; 莲藕; 铅; 镉; 铬; 砷; 汞

## Determination of lead, cadmium, chromium, arsenic and mercury in lotus root by inductively coupled plasma mass spectrometry

DAI Hua-Jun<sup>1\*</sup>, WU Qing-Ju<sup>2</sup>, ZHUANG Xiao-Hong<sup>1</sup>, YIN Qing-Hong<sup>1</sup>, ZHU Xiu-Jiang<sup>1</sup>, XIANG Yi<sup>1</sup>

(1. Chengdu Institute for Food and Drug Control, Chengdu 610045, China; 2. Chengdu Dongfang KWH Environmental Protection Catalysts Co., Ltd., Chengdu 610045, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for simultaneous determination of lead, cadmium, chromium, arsenic and mercury in lotus root by inductively coupled plasma mass spectrometry. **Methods** Lotus root was digested by microwave. <sup>209</sup>Bi, <sup>115</sup>In and <sup>72</sup>Ge were selected as the internal standard elements to overcome non-spectroscopic interference and helium was used as collision to eliminate mass spectroscopic interference. The accuracy was verified by using the national standard material rice, spinach and recovery test. The linear range, limit of detection, precision and recovery of the method were investigated. **Results** The linear ranges of lead, cadmium, chromium, arsenic and mercury were 0-50, 0-50, 0-50, 0-50 and 0-2 ug/L with the correlation coefficients *r* were 0.9996, 0.9996, 0.9991, 0.9997 and 0.9990, respectively. The average recoveries of Pb, Cd, Cr, As and Hg in samples were 97.3%, 97.5%, 95.7%, 96.0% and 97.4%, respectively. The relative standard deviations were 0.37%, 0.89%, 1.04%, 1.03%, and 1.58%, and the limits of detection were 0.001, 0.002, 0.002, 0.001 and 0.0003 mg/kg, respectively. **Conclusion** This method is suitable for simultaneous determination of lead, cadmium, chromium, arsenic and mercury in lotus root owing to easy operation, less interference, high sensitivity, low detection limit, high

\*通讯作者: 代华均, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品分析检测。E-mail: daihuajun4504@163.com

\*Corresponding author: DAI Hua-Jun, Master, Engineer, Chengdu Institute for Food and Drug Control, No.10, Wuxing Two Road, Wuhou District, Chengdu 610045, China. Email: daihuajun4504@163.com

precision and good accuracy.

**KEY WORDS:** microwave digestion; inductively coupled plasma mass spectrometry; lotus root; lead; cadmium; chromium; arsenic; mercury

## 1 引言

莲藕也称莲,是我国最具特色、栽培面积最大,品种资源最丰富的水生蔬菜<sup>[1]</sup>。莲藕营养丰富,是一种经济价值较高的植物。据《本草经疏》记载,莲藕有凉血止血、除热清胃、消散瘀血、消食止泄、生肌的作用<sup>[2,3]</sup>。近年来,随着人们生活条件的改善以及生活节奏的加快,作为一种传统的药食两用的植物,莲藕的营养成分和功能日益受到青睐。近几十年来,由于工业发展和城市的扩张,水体和土壤均遭受工业“三废”污染,农药残留、化肥污染情况也逐渐显现,莲藕等水生蔬菜的食用安全问题也引起大家的广泛关注,其中的重金属污染问题尤为突出。重金属如镉(Cd)、铅(Pb),不仅影响植株生长发育、导致水生蔬菜的减产,更重要的是污染产品,造成重金属在人体的积累,危害公民健康<sup>[4]</sup>。准确分析检测莲藕中铅、镉、铬、砷和汞的含量对人类选择莲藕有着极其重要的指导意义。

目前,测定重金属元素的方法主要有原子荧光光谱法<sup>[5-7]</sup>、原子吸收光谱法<sup>[8-11]</sup>、电感耦合等离子原子发射光谱法(inductively coupled plasma optical emission spectrometer, ICP-OES)<sup>[12-15]</sup>、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)<sup>[15-27]</sup>。电感耦合等离子体质谱法具有灵敏度高、检出限低、线性范围宽、准确度高等优点,受到众多分析工作者的喜爱。本研究建立了微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞的含量,实验选取适宜的样品预处理方法和最佳测量条件,考察分析方法的检出限、精密度和回收率,并应用该实验方法用于测定基准物质大米粉 GBW(E)100348 和菠菜 GBW10015 样品,结果与标示值相符。该法适用于测定莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞。

## 2 材料与方法

### 2.1 仪器与试剂

Thermo iCAP Q 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司); CEM MARS 240/50 微波消解仪(美国 CEM 公司); BP211D 型电子分析天平(感量 0.01 g, 德国梅特勒公司)。

汞标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.0 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 172034-1)]; 铋标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.5 mol/L 的

HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 177031-1)]; 金标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.5 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 179018-3)]; 铬标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.0 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 15081)]; 砷标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.0 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 162014-2)]; 镉标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.0 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 163041-1)]; 铅标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.0 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 173008-1)]; 锆标准溶液(1000 μg/mL, 介质 1.5 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 158035)]; 铟标准溶液(1000 mg/L, 介质 1.5 mol/L 的 HNO<sub>3</sub>)[国家有色金属及电子材料分析测试中心(唯一标识: 158107)]; 测定前配制标准系列工作液。硝酸(优级纯, 美国 Merck 公司), 其他试剂为优级纯, 水为超纯水。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 样品前处理

精密称取样品 1.000 g, 置于微波消解罐中, 加入 6 mL 硝酸, 然后按照表 1 微波消解程序进行消解。消解完毕后, 用电加热器 120 °C 赶酸至约 1 mL, 用水少量多次洗入 50 mL 容量瓶中, 定容至刻度, 混匀备用。同时做试剂空白。

#### 2.2.2 标准曲线

分别精密吸取适量铬、砷、镉、铅国家标准溶液, 用 5%硝酸溶液逐级稀释得浓度为 0、1.0、5.0、10、30、50 ng/mL 混合标准系列溶液。精密吸取 2 mL 金国家标准溶液置于 1000 mL 的容量瓶中, 用 5%硝酸溶液稀释至刻度, 作为汞标准溶液稳定剂。精密吸取适量汞国家标准溶液, 用汞标准溶液稳定剂逐级稀释得浓度为 0、0.1、0.5、1.0、1.5、2.0 ng/mL 混合标准系列溶液。精密吸取适量铋、锆、铟国家标准溶液适量, 用 5%硝酸溶液逐级稀释, 得到 25 ng/mL 的内标溶液, 实验采用在线内标加入。

#### 2.2.3 仪器条件

##### (1)微波消解

本研究采用微波消解法进行样品预处理, 微波消解条件见表 1。

##### (2)ICP-MS 条件

ICP-MS 主要操作条件见表 2。

表1 微波消解程序  
Table 1 microwave digestion procedures

步骤	功率/W	升温时间/min	温度/°C	保持时间/min
1	400	5	120	5
2	800	5	150	10
3	800	5	180	10

表2 ICP-MS 工作条件  
Table 2 Working parameters of ICP-MS

项目	工作参数	项目	工作参数
射频功率	1550	载气流量/(L/min)	1.022
采样锥与截取锥类型	Ni 锥	冷却气流量/(L/min)	15
采样深度	5	碰撞模式	He
蠕动泵转速/(r/min)	40	重复采集次数	3
雾化室温度/°C	2	分析模式	全定量分析

### 3 结果与分析

#### 3.1 消解方法的选择

在分析测试样品中无机金属元素时,需对样品进行消解以破坏样品中大量共存的有机物或还原性物质,从而将各种价态的待测元素氧化成单一的高价态。重金属测定常见的消解方法有湿法消解、微波消解、干法消解等<sup>[11]</sup>。干法消解虽然避免了酸的使用,但耗时长,容易引起待测元素的污染和损失,准确度不高。湿法消解法由于消解速度较快成为经典的消化方法,但试剂用量大,加热温度较高,会造成元素的挥发、而汞容易挥发,造成无法准确测定其中的汞。微波消解法具有待测元素不易损失,消解速度快,取样量少,酸试剂用量少且能完全消解,背景干扰小,操作简便且兼顾环境保护等优点。本研究选用微波消解法对样品进行前处理,以满足快速准确高效的测定莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞。

#### 3.2 干扰及消除

在质谱分析中通常存在 2 种影响准确测定的干扰即质谱干扰和非质谱干扰。采用电感耦合等离子体质谱法测定莲藕中铅、镉、铬、砷和汞存在同量异位素、多原子、双电荷离子等质谱干扰,本实验采用最优化仪器条件(降低氧化物和双电荷的产生)和碰撞反应池(He 模式下对可能出现的各类干扰能有效地消除)等方法来消除。非质谱干扰主要源于样品基体,莲藕的化学成分主要包括:蛋白质、脂肪、碳水化合物、钙、磷、铁和水等物质<sup>[27]</sup>。莲藕消解后的样品溶液中含有复杂的基质,存在基体效应,对待测元素产生较强的抑制作用,致使检测结果的准确度降低。克服基体效应最有效的方法是稀释样品、内标校正。本实验通过在线加入高中低质量数 209 Bi、115 In、72 Ge 内标溶液监测信号变动情况,用内标法定量。采用内标溶液校正待测元素,可以有效的消除基体干扰,提高检测结果的准确性。

#### 3.3 线性范围及检出限、定量限

在最佳试验条件下,以铅 Pb、镉 Cd、铬 Cr、砷 As 和汞 Hg 的质谱信号强度(counts per second, CPS)与 Ge、In、Bi 的质谱信号强度(CPS)的比值为纵坐标, Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 浓度为横坐标绘制标准曲线,得到拟合工作曲线方程。在线性范围内该方法线性关系良好,检出限和定量限低(见表 3)。

#### 3.4 方法回收率

取处理均匀后的莲藕样品,分别准确称取 1.000 g,再分别加入浓度为 0.1 μg/mL 的汞标液 0.05、0.25、1.0 mL,浓度为 1 μg/mL 的镉、铅、镉、砷混合标液 0.05、0.25、1.5 mL,得到含有汞 0.1、0.5、2 μg/L,含有 Pb、Cd、Cr、As, 1、5、30 μg/L 的低、中、高加标样品,再按 2.2.1 处理样品,分别进样分析。内标法进行校正,以测定结果对应的加标量计算 5 种元素的回收率。5 种元素的 3 个浓度点的回收率在 89.7%~100.8%之间,平均加标回收率分别为 97.3%、97.5%、95.7%、96.0%和 97.4% (见表 4),方法准确度较高。

表3 元素线性方程、相关系数、检出限及定量限  
Table 3 Element linear equations, correlation coefficients, limits of detection and limits of quantitation

元素	线性范围/(μg/L)	线性方程	相关系数	检出限/(mg/kg)	定量限/(mg/kg)
铅 Pb	0~50	$Y=66672.6282X+36325.4343$	0.9996	0.001	0.004
镉 Cd	0~50	$Y=4231.2782X+2168.3517$	0.9996	0.002	0.007
铬 Cr	0~50	$Y=11213.4521X+270.0073$	0.9991	0.002	0.008
砷 As	0~50	$Y=921.3748X+20.1411$	0.9997	0.001	0.004
汞 Hg	0~2	$Y=15411.2472X+63.3493$	0.9990	0.0003	0.001

表 4 试样中 Pb、Cd、Cr、As 和 Hg 的加标回收率  
Table 4 Recoveries of Pb, Cd, Cr, As and Hg in samples

元素	样品含量 /( $\mu\text{g/L}$ )	加标量 /( $\mu\text{g/L}$ )	测定总量 /( $\mu\text{g/L}$ )	回收率/%
Pb	0	1	0.924	92.4
		5	4.956	99.1
		30	30.12	100.4
Cd	0	1	0.932	93.2
		5	4.991	99.8
		30	29.81	99.4
Cr	0	1	0.897	89.7
		5	4.893	97.9
		30	29.83	99.4
As	0	1	0.908	90.8
		5	5.012	100.2
		30	29.07	96.9
Hg	0	0.1	0.092	92.0
		0.5	0.481	99.5
		2	2.016	100.8

### 3.5 仪器精密度测试

先向空白样品里加浓度为  $0.1 \mu\text{g/mL}$  的汞标液  $0.25 \text{ mL}$ , 浓度为  $1 \mu\text{g/mL}$  的镉、铅、镉、砷混合标液  $0.25 \text{ mL}$ , 得到含 Hg 浓度为  $0.5 \mu\text{g/L}$ , 含 Pb、Cd、Cr、As 浓度为  $5 \mu\text{g/L}$

的加标样品, 再按 2.2.1 进行前处理, 然后按表 2 的仪器条件测定, 每次重复测定 6 次, 记录测量值, 计算仪器的精密密度(见表 5)。相对标准偏差(relative standard deviation, RSD) $<2\%$ , 说明仪器精密密度良好。

### 3.6 方法重复性测定

准确称取处理后的空白莲藕样品  $1.000 \text{ g}$ , 再分别加入浓度为  $0.1 \mu\text{g/mL}$  的汞标液  $0.25 \text{ mL}$ , 浓度为  $1 \mu\text{g/mL}$  的镉、铅、镉、砷混合标液  $0.25 \text{ mL}$ , 得到消解后理论上含有 Hg 浓度为  $0.5 \mu\text{g/L}$ , Pb、Cd、Cr、As 浓度为  $5 \mu\text{g/L}$  的溶液。同样方法处理 6 份平行样, 连续进样分析。内标法进行校正, 以测定结果的相对标准偏差计算 5 种元素的重复性结果。方法重复性相对标准偏差结果在  $0.37\% \sim 2.07\%$  之间(见表 6), 方法稳定性良好。

### 3.7 标准物质的测定

为验证本实验方法的准确性和可靠性, 在选择的操作步骤和操作条件下对基准物质大米粉 GBW(E)100348 和菠菜 GBW10015 进行测定。标准物质的测定值和标准值见表 7, 测定值均在其标准值范围内。说明本方法可靠、准确性高。

### 3.8 不同仪器测试方法的比对

为验证本实验方法的准确性和可靠性, 对基准物质菠菜 GBW10015 采用同样的前处理办法, 在最优化的仪器条件下, 采用 ICP-MS 法、原子吸收光谱法和原子荧光光谱法进行了测定。不同测试结果均在其标准值范围内(见表 8), 说明本方法测试结果准确可靠。

表 5 精密度结果( $\mu\text{g/L}$ )  
Table 5 The results of precision ( $\mu\text{g/L}$ )

元素	1	2	3	4	5	6	RSD/%
Pb	5.012	4.981	4.993	5.021	4.981	4.976	0.37
Cd	4.982	4.892	5.001	4.872	4.938	4.939	0.89
Cr	4.893	4.932	5.003	5.024	4.971	5.011	1.04
As	5.012	5.017	4.991	4.989	4.982	4.891	1.03
Hg	0.481	0.477	0.483	0.470	0.496	0.469	1.58

表 6 重复性测试结果( $\mu\text{g/L}$ )  
Table 6 The results of repeatability ( $\mu\text{g/L}$ )

元素	1	2	3	4	5	6	RSD/%
Pb	4.956	4.932	4.939	4.963	4.971	4.956	0.37
Cd	4.991	4.893	5.011	5.007	5.002	4.969	1.01
Cr	4.895	4.932	4.997	5.004	5.013	5.024	1.03
As	4.995	5.019	5.024	4.984	5.032	4.893	0.92
Hg	0.483	0.497	0.489	0.479	0.476	0.481	2.07

**表 7 测定结果及标准物质的标准值**  
**Table 7 Determination results and value of certified reference materials**

标准物质	元素/(mg/kg)	标准值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)
大米粉	Pb	0.12±0.02	0.124
	Cd	0.24±0.01	0.243
	Cr	0.064±0.008	0.0671
	As	0.23±0.03	0.221
	Hg	0.005±0.001	0.00531
菠菜	Pb	11.1±0.9	11.5
	Cd	0.15±0.025	0.162
	Cr	1.4±0.2	1.41
	As	0.23±0.03	0.241
	Hg	0.02±0.003	0.0211

### 3.9 实际样品的测定

采用上述方法对市场上收集的 37 批莲藕样品进行检测, 结果见表 9。37 批样品中汞、铅、铬均未检出, 其中 12 批样品检出了砷, 含量范围为 0.00536~0.0179 mg/kg; 19 批样品检出镉元素, 含量范围为 0.00950~0.0226 mg/kg, 可能是土壤受到镉和砷的污染, 富集到莲藕上造成。

## 4 结 论

本研究建立了电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞含量的方法, 优化了前处理条件, 即选定微波消解法消化样品, 选择了合适的消解液体系; 采用内标法消除基质干扰。对方法的线性范围、检出限、定量限, 回收率试验、精密度的试验进行了考查, 同时采用该方法测定标准物质, 结果符合要求。该方法具有操作简单、重复性好、灵敏度高优点, 适用于莲藕中的铅、镉、铬、砷和汞含量的分析检测。

**表 8 不同仪器测试结果(mg/kg)**  
**Table 8 The results obtained by different instruments(mg/kg)**

方法	Pb	Cd	Cr	As	Hg
电感耦合等离子体质谱法/ICP-MS	11.5	0.162	1.41	0.241	0.0211
原子吸收光谱法/AAS	11.2	0.158	1.41	—	—
原子荧光光谱法/AFS	—	—	—	0.249	0.0223

注: —表示未测试。

**表 9 样品的测定结果(mg/kg)**  
**Table 9 Determination results of samples (mg/kg)**

样品编号	Pb	Cd	Cr	As	Hg
1	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
2	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
3	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
4	N.D	N.D	N.D	0.00536	N.D
5	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
6	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
7	N.D	0.0116	N.D	N.D	N.D
8	N.D	N.D	N.D	0.0179	N.D
9	N.D	0.0130	N.D	N.D	N.D
10	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
11	N.D	N.D	N.D	0.0126	N.D
12	N.D	0.0109	N.D	N.D	N.D
13	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
14	N.D	0.0113	N.D	0.00946	N.D
15	N.D	N.D	N.D	0.00666	N.D
16	N.D	0.00950	N.D	N.D	N.D
17	N.D	0.0112	N.D	N.D	N.D
18	N.D	0.0201	N.D	0.00788	N.D

续表 9

样品编号	Pb	Cd	Cr	As	Hg
19	N.D	0.0151	N.D	N.D	N.D
20	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
21	N.D	0.0148	N.D	0.0167	N.D
22	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
23	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
24	N.D	N.D	N.D	0.0177	N.D
25	N.D	0.0131	N.D	0.00646	N.D
26	N.D	0.0125	N.D	N.D	N.D
27	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
28	N.D	0.0226	N.D	N.D	N.D
29	N.D	0.0193	N.D	N.D	N.D
30	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
31	N.D	0.0122	N.D	0.0179	N.D
32	N.D	0.0166	N.D	N.D	N.D
33	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
34	N.D	0.0144	N.D	0.00959	N.D
35	N.D	0.0165	N.D	N.D	N.D
36	N.D	0.0129	N.D	N.D	N.D
37	N.D	0.0144	N.D	0.0106	N.D

注: N.D 表示未检出。

## 参考文献

- [1] 柯卫东, 李峰, 刘玉平, 等. 我国莲资源及育种研究综述(上)[J]. 长江蔬菜, 2003, (4): 5-9.  
Ke WD, Li F, Liu YP, *et al.* Summary of research on lotus resources and breeding in China (I) [J]. *J Changjiang Veget*, 2003, (4): 5-9.
- [2] 谢晋, 韩迪, 王靖, 等. 中国莲藕产业发展现状及展望[J]. 农业展望, 2017, 13(12): 42-45, 51.  
Xie J, Han D, Wang J, *et al.* Present situation and prospect of lotus root industry in China [J]. *Agric Prospects*, 2017, 13(12): 42-45, 51.
- [3] 中医中药网. [EB/OL]. [2017-07-10]. <http://www.zhzyw.org/zycs/zycd/o/089112-017F2GEH0HEJBHJF0.3.html>.  
Traditional Chinese medicine network. [EB/OL]. [2017-07-10]. <http://www.zhzyw.org/zycs/zycd/o/089112-017F2GEH0HEJBHJF0.3.html>
- [4] 许晓光, 卢永恩, 李汉霞. 镉和铅在莲藕各器官中累积规律的研究 [J]. 长江蔬菜, 2010, (14): 53-56.  
Xu XG, Lu YE, Li HX. Accumulative law of Cd and Pb in different organs of lotus [J]. *J Changjiang Veget*, 2010, (14): 53-56.
- [5] 李赛峰. 原子荧光光谱法测定土壤中有害重金属含量的探讨[J]. 世界有色金属, 2018, (17): 254, 256.  
Li SF. Determination of harmful heavy metals in soil by atomic fluorescence spectrometry [J]. *World Nonferr Metal*, 2018, (17): 254, 256.
- [6] 韩萍. 微波消解-双道原子荧光光谱法测定蔬菜中的汞[J]. 南方农业, 2018, (29): 120-121.  
Han P. Determination of mercury in vegetables by microwave digestion-dual-channel atomic fluorescence spectrometry [J]. *Southern Agric*, 2018, (29): 120-121.
- [7] 乔玲. 微波消解-原子荧光对蘑菇中砷的测定与分析[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(8): 155-157.  
Qiao L. Determination and analysis of arsenic in mushrooms by microwave digestion-atomic fluorescence spectrometry [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(8): 155-157.
- [8] 杜官恒, 吴升德, 汤勇, 等. 微波消解石墨炉原子吸收法测定藕粉圆中铅镉[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(18): 172-175.  
Du GH, Wu SD, Tang Y, *et al.* Determination of lead and cadmium in lotus root noodles by graphite furnace atomic absorption spectrometry with microwave digestion [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(18): 172-175.
- [9] 王绍青, 张丹丹, 张震, 等. 石墨炉原子吸收光谱法检测市售藕粉中重金属 Pb 和 Cd 的含量[J]. 安徽农业科学, 2016, (17): 94-95.  
Wang SQ, Zhang DD, Zhang Z, *et al.* Graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of heavy metals Pb and Cd in lotus root flour [J]. *Anhui Agric Sci*, 2016, (17): 94-95.
- [10] 李志娟, 王金星. 微波消解-石墨炉原子吸收法测定食品中铅、镉和铜[J]. 医学动物防制, 2012, (1): 107-109.  
Li ZJ, Wang JX. Microwave digestion-graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of lead, cadmium and copper in food [J]. *Med Anim Contr*, 2012, (1): 107-109.
- [11] 鲍会梅. 大米中两种预处理方法对镉测定的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(1): 177-180.  
Bao HM. The effect of two pretreatment methods on the determination of cadmium in rice [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(1): 177-180.
- [12] 李艳红, 彭伟, 张文熙. 微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法分析食品胶中 Pb、Cr、Cd、Se、Hg [J]. 广东化工, 2018, 45(20): 144-145.  
Li YH, Peng W, Zhang WX. Microwave digestion-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry for the determination of Pb, Cr, Cd, Se and Hg in food gums [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2018, 45(20): 144-145.
- [13] 陈茂勇, 那崇伍. 同时测定土壤中 Pb、Cr 的微波消解电感耦合等离子体发射光谱法[J]. 职业与健康, 2018, 34(15): 2057-2059.  
Chen MY, Na CW. Simultaneous determination of Pb and Cr in soil by microwave digestion inductively coupled plasma emission spectrometry [J]. *Occup Health*, 2018, 34 (15): 2057-2059.
- [14] 张俊峰, 栾海光, 李杨. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定粗铋中的 As、Bi、Cd、Cu、Fe、Pb 和 Se [J]. 中国无机分析化学, 2018, 8(3): 36-39.  
Zhang JF, Luan HG, Li Y. Determination of As, Bi, Cd, Cu, Fe, Pb and Se in crude antimony by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) [J]. *China Inorg Anal Chem*, 2018, 8(3): 36-39.
- [15] GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].  
GB 5009.268-2016 National food safety standard-Determination of multicomponents in food [S].
- [16] 于颖. ICP-MS 测定沙葱中 5 种重金属元素[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 136-138.  
Yu Y. ICP-MS determination of five heavy metals in *Allium mongolicum* [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(16): 136-138.
- [17] 李耀磊, 张志成, 金红宇, 等. ICP-MS 法测定复方苦参注射液铜、镉、汞、铅元素的残留量[J]. 药物分析杂志, 2018, 38(10): 1781-1787.  
Li YL, Zhang ZC, Jin HY, *et al.* ICP-MS determination of copper, arsenic, cadmium, mercury and lead in compound *sophora flavescens* injection [J]. *J Pharm Anal*, 2018, 38(10): 1781-1787.
- [18] 黎施展. 电感耦合等离子体质谱法检测蔬菜中的 5 种有害金属元素[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10): 150-153.  
Li SZ. Detection of five harmful metal elements in vegetables by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(10): 150-153.
- [19] 张宏康, 王中媛, 蔡斯斯. ICP-MS 测定食品及相关产品中重金属等元素的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, (17): 195-200.  
Zhang HK, Wang ZY, Cai SS. Progress in the determination of heavy metals and other elements in food and related products by ICP-MS [J]. *Food Res Dev*, 2016, (17): 195-200.
- [20] 徐华, 凌睿. 硝酸基体对 ICP-MS 测定香菇中镉、砷、铅的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(6): 169-171.  
Xu H, Ling R. Effect of nitric acid matrix on ICP-MS determination of cadmium, arsenic and lead in *lentinus edodes* [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(6): 169-171.
- [21] 王永姣, 张鑫, 张亚锋, 等. ICP-MS 法测定辅助降血糖类保健食品中 6 种有害的重金属元素[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 121-125.  
Wang YJ, Zhang X, Zhang YF, *et al.* ICP-MS determination of six harmful heavy metals in hypoglycemic health food [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(13): 121-125.
- [22] 李刚凤, 熊冬华, 杨天友, 等. 梵净山绿茶中 10 种有害元素含量测定分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 126-129.  
Li GF, Xiong DH, Yang TY, *et al.* Determination and analysis of 10 harmful elements in Fanjingshan green tea [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(1): 126-129.
- [23] 陈美珠, 张琦, 卢彩兰, 等. 食品中金属元素砷、镉、铅等 ICP-MS 法

- 的测定[J]. 中国城乡企业卫生, 2018, 33(10): 49-50.
- Chen MZ, Zhang Q, Lu CL, *et al.* Determination of metal elements arsenic, cadmium and lead in food by ICP-MS [J]. *China's Urban Rural Enterp Health*, 2018, 33(10): 49-50.
- [24] 刘奋, 戴京晶, 林奕芝, 等. ICP-MS 测定食品中多种金属元素[J]. 现代预防医学, 2002, (1): 43-45.
- Liu F, Dai JJ, Lin YZ, *et al.* ICP-MS determination of multiple metal elements in food [J]. *Mod Prev Med*, 2002, (1): 43-45.
- [25] 乔秋菊, 夏昊云, 黄为红, 等. 微波消解-ICP-MS 法测定小麦粉及其制品中 17 种元素[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(17): 171-175.
- Qiao QJ, Xia HY, Huang WH, *et al.* Determination of 17 elements in wheat flour and its products by microwave digestion-ICP-MS [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(17): 171-175.
- [26] 陈宏靖, 杨艳. 电感耦合等离子发射光谱质谱法测定花粉中多种金属元素含量[J]. 海峡预防医学杂志, 2018, 24(5): 58-60.
- Chen HJ, Yang Y. Inductively coupled plasma emission mass spectrometry for the determination of multiple metal elements in pollen [J]. *J Strait Prev Med*, 2018, 24(5): 58-60.
- [27] 周春华, 陶俊, 李良俊, 等. 莲藕的化学成分与生物活性研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, (4): 63-69.
- Zhou CH, Tao J, Li LJ, *et al.* Research progress on chemical constituents and biological activities of lotus root [J]. *Amino Acid Biol Resour*, 2007, (4): 63-69.

(责任编辑: 苏笑芳)

## 作者简介



代华均, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品分析检测。

E-mail: daihuajun4504@163.com