

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240718002

电感耦合等离子体质谱法测定大米粉中砷、铬、镉和铅元素的两种前处理方法比对研究

徐晓伟, 肖景成*

(鄂尔多斯市疾病预防控制中心, 鄂尔多斯 017010)

摘要: **目的** 比对电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测大米粉中砷(As)、铬(Cr)、镉(Cd)和铅(Pb) 4 种元素的两种前处理方法。**方法** 使用微波消解法和湿消解法对大米粉标准品进行前处理, 采用 ICP-MS 检测元素含量, 分别使用 Z-比分数、标准值比较、平行偏差和加标回收率实验, 比较微波消解和湿消解法对元素含量测定结果的影响。**结果** 采用外标法建立的 4 种元素标准曲线的线性关系良好, 相关系数(r)>0.999。两种消解方法的 $|Z|$ 均小于 2, 平行偏差均小于 5%[湿消解法(1.5 h, 120 °C)]。使用湿消解法(1.5 h, 120 °C)消解的大米粉中元素含量测定值更接近标准值。使用微波消解法的加标回收率分别为 As 82.7%、Cr 95.9%、Cd 83.0%、Pb 101.4%, 而使用湿消解法(1.5 h, 120 °C)的加标回收率分别为 As 85.7%、Cr 99.0%、Cd 96.8%、Pb 112.8%, 湿消解法(1.5 h, 120 °C)的加标回收率均高于微波消解法。**结论** 使用湿消解法(1.5 h, 120 °C)作为前处理方法, 在检测大米粉中元素含量的准确性要优于微波消解法, 且具有简便、高效的特点。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 微波消解; 湿消解法; 大米粉; 有害元素

Comparative study of 2 kinds of pretreatment methods for determination of arsenic, chromium, cadmium and lead in rice flour by inductively coupled plasma mass spectrometry

XU Xiao-Wei, XIAO Jing-Cheng*

(Ordos Center for Disease Control and Prevention, Ordos 017010, China)

ABSTRACT: Objective To compare 2 kinds of pretreatment methods of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of 4 kinds of elements (As, Cr, Cd and Pb) in rice flour. **Methods** Microwave digestion method and wet digestion method were used to pretreat the standard rice flour and the element content were detected by ICP-MS. The effect of two methods on element content determination were compared through Z-score method, comparing with standard values, parallelism error comparison and spiked recoveries experiments. **Results** The linear relationship between 4 kinds of element standard curves established using the external standard method was good, with a correlation coefficient (r)>0.999. The $|Z|$ of both digestion methods were less than 2, and the parallel deviation was less than 5% [wet digestion method (1.5 h, 120 °C)]. The measured value of element content in rice noodles digested by wet digestion method (1.5 h, 120 °C) was closer to the standard value. The recovery rates of As

*通信作者: 肖景成, 博士, 中级食品检验师, 主要研究方向为功能化纳米材料在食品安全检测中的应用。E-mail: 29122043@qq.com

*Corresponding author: XIAO Jing-Cheng, Ph.D, Intermediate Food Inspector, Ordos Center for Disease Control and Prevention, Ordos 017010, China. E-mail: 29122043@qq.com

using microwave digestion method were 82.7% Cr 95.9%, Cd 83.0%, Pb 101.4%, the recovery rates of As using wet digestion method (1.5 h, 120 °C) were 85.7% Cr 99.0%, Cd 96.8%, Pb 112.8%, the spiked recovery rate of wet digestion method (1.5 h, 120 °C) was higher than that of microwave digestion method. **Conclusion** The accuracy of element content determination in rice flour using the wet digestion method as the pretreatment method is better than that of microwave digestion method, and it has the characteristics of simplicity and efficiency.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; microwave digestion method; wet digestion method; rice flour; harmful elements

0 引言

近几年来,我国的食品安全问题越来越多,水果、蔬菜和鱼类中的砷含量超标、海产品中的铬含量超标、大米中的铅含量超标以及食品中的镉超标等问题层出不穷^[1-6]。为保证各类食品的质量安全,内蒙古自治区从2011年开始实施食品风险监测机制,每年对食品中有害元素实施监测,汇总数据致国家风险监测机构^[7-9]。大米是我国居民的主食之一,大米的质量安全与每个人都息息相关。长期摄入有害元素超标的大米将会对人体的健康造成严重的影响,比如人体内的铅含量过多,将对人身体的中枢神经系统造成伤害,引起头痛、注意力不集中、易怒、记忆力丧失和迟钝。除此之外,铅过量还会对儿童智力造成影响,严重的甚至可造成痴呆^[10-11]。过量铬会导致皮肤过敏,还会损害人体的呼吸系统和消化系统^[12-13]。过量镉会增加人体患癌症的风险,还会对人体的生殖系统造成严重影响,镉中毒甚至导致痛痛病^[14-15]。砷作为类金属,其物理、化学性质也介于金属和非金属之间,在环境中同样具有生物累积、不可降解等特性。砷在人体中过量累积可能引起皮肤色斑、角化和癌变,慢性砷中毒还会对消化系统、泌尿系统、神经系统和肝脏造成不同程度的损伤^[16-17]。由此可知,摄入过量有害元素的食品会对人体健康造成非常大的损害,应该密切关注食品中的有害元素含量监测,防止不合格食品流入市场,对民众造成危害。

目前,检测食品中有害元素的方法有原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy, AAS)^[18]、原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectroscopy, AFS)^[19]、电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma emission spectroscopy, ICP)^[20]和电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)等^[21-22]。研究表明,ICP-MS具有多元素同时测定、极宽线性动态范围、极高灵敏度和检出限、较快的分析速率、很少的样品量、谱线干扰少、准确性高等优点。目前,GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》也使用了ICP-MS。然而在国标方法中,样品前处理方法主要有微波消解法和压力罐消解法,没有湿消解法^[23-24]。微波消解法和压力罐消解法使用聚四氟乙烯消解管,定容时会对样品造成损失,

减少样品中元素含量。而且消解后还需要很长时间赶酸,耗时费力^[25]。通过查阅文献,有学者研究通过改进的湿消解法消解大米粉,能够达到与微波消解同等的检测效率^[26-28]。但相关文献没有具体的研究方法,也只是对个别的元素进行了研究。因此,本研究以 ICP-MS 检测大米粉中的砷、铬、镉和铅 4 种有害元素含量,并对比分析微波消解和湿消解两种前处理方法,以期为大米粉中有害元素的监测提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器

NEXION350X 型电感耦合等离子体质谱仪(美国珀金埃尔默仪器有限公司); Mars 型微波消解仪(美国 CEM 公司); SQP 电子天平[精度 0.0001 g, 赛多利斯科学仪器(上海)有限公司]; AED-UT 自控电热消化器(北京中西华大科技有限公司); BFGS-20A 赶酸器(北京信达达科技有限公司)。

1.2 材料与试剂

硝酸(金属-氧化物-半导体电路专用的特纯试剂,北京化学试剂研究所); 多元素混合标准溶液(100 μg/mL)、内标钪、铟和铋标准溶液(20 μg/L)(国家有色金属及电子材料分析测试中心); 大米粉中砷、铬、镉和铅含量检测内部质控样品(大连中食国实检测技术有限公司); 调谐液(1 μg/L, 美国珀金埃尔默仪器有限公司)。

1.3 器皿的处理

为确保检测结果的准确性,减小实验误差,实验中使用的聚四氟乙烯消解管、容量瓶等用 50%硝酸浸泡 24 h 以上,取出后先用自来水清洗,再用超纯水反复润洗后使用^[29-31]。

1.4 实验方法

1.4.1 样品预处理

(1)微波消解法

准确称取 0.3 g 左右大米粉质控样品(平行测定 3 次)和加标样品(低、中和高浓度 3 个)于聚四氟乙烯消解管中,再加入 5 mL 硝酸,拧紧管盖,过夜。之后,将样品放在微波消解仪上,根据微波消解仪使用说明书对样品进行消解,

消解条件见表 1。消解完成后, 将样品放在赶酸器上进行赶酸 2 h。赶酸完成后, 冷却样品, 缓慢拧开瓶盖排气, 防止硝酸气体喷溅, 造成样品损失。处理完成后将样品转移至 25 mL 容量瓶中, 并使用超纯水清洗聚四氟乙烯消解管 3~4 次, 洗液倒入容量瓶中。之后将溶液定容至刻度线, 混匀后留存备用待检, 同步做空白实验(平行测定 3 次)。

表 1 微波消解条件
Table 1 Microwave digestion conditions

步骤	温度/°C	升温/min	恒温/min
1	120	5	10
2	150	5	15
3	190	5	40

(2) 湿消解法

准确称取 0.3 g 左右大米粉质控样品(平行 9 份)和加标样品(平行 9 份)于 25 mL 带刻度的耐温(120 °C)离心管中, 分别加入 5 mL 硝酸, 拧紧瓶盖, 预消解 3 h。之后平行样和加标样按时间 1.0、1.5 和 2.0 h 分成 3 组, 每一组的 3 份平行样和 3 份加标样放入自控电热消化器上加热消化, 加热温度为 120 °C。加热时将瓶盖稍微旋开, 防止管内硝酸气体气压过大。在回流状态下完成消解后, 直接在立式离心管中进行赶酸处理, 直至管中样品颜色澄清(约 30 min), 之后将样品放在离心机上离心, 确保样品溶液在管壁上无残留。从离心机上依次取下 3 组平行样品和加标样品, 待冷却后在离心管中直接定容, 同步做空白实验(平行测定 3 次)。

1.4.2 标准溶液的配制

砷、铬、镉和铅中间液的配制: 本研究选择的标准储备液质量浓度为 100.0 μg/mL, 量取标准储备液 1 mL 于 100 mL 容量瓶中, 然后加入 1% 的硝酸定容至刻度, 进行稀释得到 1000.0 μg/L 的中间液。

曲线标准溶液的配制: 将中间液依次稀释制得砷、铬、镉和铅标准系列工作溶液, 其质量浓度从小到大分别为 0.0、1.0、5.0、10.0、50.0 和 100.0 μg/L。

1.4.3 ICP-MS 测定

当仪器达到真空标准后, 调整仪器相关参数, 具体做法如下: 取 1 μg/L 的调谐液, 分别校准仪器灵敏度、双电荷、氧化物和分辨率等, 确保其符合测定标准和要求。根

据待检测元素的性质, 选择铈作为砷和铬的内标元素, 钪作为镉的内标元素, 铋作为铅的内标元素。分别将标准曲线各浓度溶液、微波消解处理大米粉所得的 3 份空白样、3 份标准样品和 3 份加标样品, 以及 3 组湿法(1.0、1.5 和 2.0 h)处理的大米粉各 3 份空白样、3 份标准样品和 3 份加标样品溶液依次使用蠕动泵管引入 ICP-MS 仪中。分析内标元素质谱信号、待测元素色谱信息强度, 并对待测元素的浓度做定量分析。

1.5 数据处理

根据该大米粉标准品的说明书可知实验结果采用“Z-比分数”评价, Z-比分数计算如式(1):

$$Z = (x - X) / \hat{\sigma} \quad (1)$$

式中, x 表示测试人所提交的测试结果; X 表示指定值; $\hat{\sigma}$ 表示标准差。当 $|Z| \leq 2$, 测试结果满意; 当 $2 < |Z| < 3$, 测试结果合格; 当 $|Z| \geq 3$, 测试结果不满意(离群)。

用 Excel 2019 软件对检测结果进行统计分析, 计算元素含量并与标准值比较差异(标准值以标准样品证书为准); 计算平行样标准偏差, 平行偏差小于 5% 为标准; 计算加标回收率(要求 80%~120%)。

2 结果与分析

2.1 标准曲线

利用电感耦合等离子体质谱仪测定标准系列各工作溶液, 绘制各个元素的标准曲线, 其回归方程如表 2。从表 2 中可以发现砷、铬、镉和铅这 4 种元素的标准曲线相关系数(r) >0.999 , 说明这 4 种元素的曲线线性关系良好。同时平行测定 11 次空白溶液, 计算在两种前处理方法下, 4 种元素的方法检出限, 从表 2 中看到, 湿消解法检出限为 0.001~0.020 mg/kg。微波消解法检出限为 0.001~0.030 mg/kg。检出限越小说明方法越灵敏, 可以得出湿消解法比微波消解法的方法检出限更小, 方法更灵敏。

2.2 元素测量值与标准值的比较

由实验结果可得, 大米粉经过微波消解法和湿消解法处理, 测得 4 种有害元素含量值与标准值比较, $|Z|$ 值均小于 2。说明大米粉经两种消解方法处理后, 检测砷、铬、镉和铅 4 种有害元素含量的方法可行性均较好, 结果见表 3。

表 2 4 种元素的相关系数、回归方程及检出限
Table 2 Correlation coefficients, regression equations and limits of detection of 4 kinds of elements

元素	内标元素	相关系数(r)	回归方程	湿消解法检出限/(mg/kg)	微波消解法检出限/(mg/kg)
砷	铈	0.9999	$Y=0.021X$	0.001	0.001
铬	铈	0.9999	$Y=0.270X$	0.020	0.030
镉	钪	0.9999	$Y=0.006X$	0.001	0.001
铅	铋	0.9999	$Y=0.034X$	0.010	0.020

表 3 微波消解法和湿消解法测定结果 Z 值评价表

Table 3 Z-value evaluation table for microwave digestion method and wet digestion method measurement results

元素	Z 值			
	微波消解	湿消解 1.0 h	湿消解 1.5 h	湿消解 2.0 h
砷	-1.000	-1.045	-0.977	-1.773
铬	-0.056	-0.419	0.075	-0.475
镉	-0.788	-0.788	-0.242	-0.909
铅	0.956	1.622	1.000	1.089

注: 在实验过程中, 由于酸对镉元素的影响很大, 在检测镉时, 将待测溶液稀释 2 倍后进行测定, 以提高加标回收率。

大米粉经两种前处理方法所得测量值与标准值的比较结果见表 4。可以看出, 微波消解的大米粉中砷、铬、镉和铅这 4 种元素的含量均在标准值范围内。同时, 3 个时

间条件(1.0、1.5、2.0 h)湿消解处理的大米粉中, 1.5 h, 120 °C 湿消解的大米粉中 4 种元素含量均在标准值范围内, 且砷和镉的值均比微波消解的含量值高, 测定结果更接近标准值, 铬和铅的值与微波消解的含量值接近。总体说明湿消解法(1.5 h, 120 °C)的准确性更高。

2.3 平行偏差

精密度是评价实验准确度的一个指标。实验中, 微波消解法和湿消解法分别进行平行测定, 并对两种方法的平行偏差进行计算, 结果如表 5。从表 5 中可以看到, 使用湿消解 1.0 h 和 2.0 h 处理的样品结果, 砷元素平行偏差大于 5%, 而其余元素平行偏差均在 5% 以下。表明微波消解法和湿消解法(1.5 h, 120 °C)平行测定精密度较好。

表 4 测量值与标准值的比较

Table 4 Comparison between measured values and standard values

元素	标准值 X/(mg/kg)	标准差 σ/(mg/kg)	测定值 x/(mg/kg)			
			微波消解	湿消解 1.0 h	湿消解 1.5 h	湿消解 2.0 h
砷	0.616	0.044	0.572±0.002	0.570±0.001	0.573±0.001	0.538±0.140
铬	1.810	0.160	1.801±0.150	1.743±0.110	1.822±0.003	1.734±0.023
镉	0.495	0.033	0.469±0.004	0.469±0.006	0.487±0.002	0.465±0.003
铅	0.637	0.046	0.680±0.002	0.710±0.005	0.682±0.001	0.686±0.003

表 5 微波消解法和湿消解法的平行偏差

Table 5 Parallel deviation between microwave digestion method and wet digestion method

元素	平行偏差/%			
	微波消解	湿消解 1.0 h	湿消解 1.5 h	湿消解 2.0 h
砷	0.52	5.26	3.67	21.90
铬	4.94	1.53	3.02	2.83
镉	1.07	1.71	2.04	2.15
铅	0.59	0.32	1.03	2.48

表 6 微波消解法和湿消解法的加标回收率

Table 6 Recoveries of microwave digestion and wet digestion methods

元素	加标回收率/%			
	微波消解	湿消解 1.0 h	湿消解 1.5 h	湿消解 2.0 h
砷	82.7	88.8	85.7	80.9
铬	95.9	104.6	99.0	96.2
镉	83.0	91.64	96.8	94.8
铅	101.4	111.7	112.8	106.2

2.4 4 种元素的加标回收率

加标回收也是评价实验准确度的一种方式, 本研究测定的 4 种元素的理论加标值为 20 μg/L, 加标回收率/%=(加标样品值-样品值)/理论加标值×100%, 根据公式计算每组实验的加标回收率, 结果以 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》中的技术要求为判定结果(80%~120%), 统计结果如表 6 所示。可以看出, 使用湿消解法(1.5 h, 120 °C)前处理大米粉样品的加标回收率高于使用微波消解法。这可以说明, 使用(1.5 h, 120 °C)湿消解法前处理大米粉比微波消解法的准确性更高。除此之外, 湿消解法直接在有刻度的离心管中进行消解定容, 不需要预消解过夜, 不仅减少了样品的损耗和实验的时间, 还减少了实验步骤, 使实验步骤更为简洁, 大大地提高了检测的效率。

3 结论

本研究选用微波消解法和湿消解法前处理大米粉质控样品, 通过 ICP-MS 测定大米粉中砷、铬、镉和铅 4 种有害元素的含量, 并对比两种前处理方法的优缺点。从测定结果可以看出, 使用微波消解法和湿消解法(1.5 h, 120 °C)两种前处理方法所测得的砷、铬、镉和铅 4 种元素含量, 经过“Z-比分数”计算, |Z|值均小于 2。两种消解方法平行测定精密度也较好。其中湿消解法(1.5 h, 120 °C)所得的结果较微波消解法更加靠近标准值, 两种前处理方法测定大米粉中砷、铬、镉和铅 4 种元素的加标回收率均在 80%~120%标准范围内, 其中微波消解法的加标回收率分别为: 砷 82.7%、铬 95.9%、镉 83.0%、铅 101.4%; 改进的湿消解法(1.5 h, 120 °C)的加标回收率分别为: 砷 85.7%、铬

99.0%, 镉 96.8%、铅 112.8%, 但湿消解法(1.5 h, 120 °C)测定大米粉中 4 种有害元素的加标回收率要高于微波消解法。由此可以说明, 相对于微波消解法, 湿消解法(1.5 h, 120 °C)作为样品的前处理方法具有准确性更高、检测效率更高的优点。

除此之外, 在实验过程中, 湿消解法直接在离心管中进行消解和定容, 预消解时间短, 缩减了转移样品溶液定容的实验步骤, 节约了实验时间并减少样品的消耗。改进后的湿消解法(1.5 h, 120 °C)在大米有害元素检测中可作为一种准确、高效、便捷的前处理方法。该方法有望应用到技术人员的检测实践中, 同时可以为食品风险手册的制定及国家标准的制定提供依据。

参考文献

- [1] 樊璐. 浅议我国食品监管的问题及对策[J]. 中国食品工业, 2022(23): 45-47, 60.
FAN L. A brief discussion on the problems and countermeasures of food supervision in China [J]. Food Ind Chin, 2022(23): 45-47, 60.
- [2] 谢作文, 吴思逸, 谭雪松, 等. 食品中重金属砷的危害及其检测方法[J]. 中国食品, 2022(24): 94-96.
XIE ZW, WU SY, TAN XS, *et al.* The hazards and detection methods of heavy metal arsenic in food [J]. China Food, 2022(24): 94-96.
- [3] 骆和东, 吴雨然, 姜艳芳. 我国食品中铬污染现状及健康风险[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(6): 717-721.
LUO HD, WU YR, JIANG YF. The current situation and health risks of chromium contamination in food in China [J]. Chin J Food Hyg, 2015, 27(6): 717-721.
- [4] 韦冰, 蒋菊媛, 覃均生, 等. 测量系统分析在大米镉、铅元素检测中的应用研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2023, 29(3): 321-327.
WEI B, JIANG JY, QIN JS, *et al.* Application of measurement system analysis in cadmium and lead element detection in rice [J]. Anal Test Technol Instrum, 2023, 29(3): 321-327.
- [5] 马玲, 杨立学, 王可, 等. ICP-MS 对超市和个体售淀粉类食品中重金属铅的测定及分析[J]. 医学动物防制, 2024, 40(4): 414-417.
MA L, YANG LX, WANG K, *et al.* ICP-MS determination and analysis of heavy metal lead in starch based foods for supermarkets and individual sales [J]. J Med Pest Control, 2024, 40(4): 414-417.
- [6] KOPRU S, CADIR M, SOYLAK M. Investigation of trace elements in vegan foods by ICP-MS after microwave digestion [J]. Biol Trace Elem Res, 2022, 200(12): 5298-5306.
- [7] 刘松华. 食品安全日常监测中风险评估技术的应用与分析[J]. 现代食品, 2019(23): 123-125, 146.
LIU SH. Application and analysis of risk assessment techniques in daily monitoring of food safety [J]. Mod Food, 2019(23): 123-125, 146.
- [8] 商慧敏, 陆秀军, 蒲云霞. 2019—2021 年内蒙古地区畜禽肉及内脏中 5 种重金属污染调查[J]. 卫生研究, 2023, 52(1): 148-151.
SHANG HM, LU XJ, PU YX. Investigation on pollution of five heavy metals in livestock and poultry meat and organs in Inner Mongolia from 2019 to 2021 [J]. J Hyg Res, 2023, 52(1): 148-151.
- [9] 蒲云霞, 单美娜, 陈志民, 等. 2012—2016 年内蒙古地区主要食品中铅镉总汞污染调查分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, 30(2): 177-181.

- PU YX, SHAN MN, CHEN ZM, *et al.* Investigation and analysis of lead, cadmium, and total mercury pollution in major foods in Inner Mongolia from 2012 to 2016 [J]. Chin J Food Hyg, 2018, 30(2): 177-181.
- [10] 朱元州, 赵慧, 甘泉, 等. 成人铅中毒[J]. 巴楚医学, 2023, 6(4): 14-28.
ZHU YZ, ZHAO H, GAN Q, *et al.* Adult lead poisoning [J]. Bachu Med J, 2023, 6(4): 14-28.
- [11] 黄飞飞, 张宁, 赵敏娟, 等. 2016—2018 年苏州市水生蔬菜重金属污染状况分析及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 648-654.
HUANG FF, ZHANG N, ZHAO MX, *et al.* Analysis of heavy metal pollution status and health risk assessment of aquatic vegetables in Suzhou City from 2016 to 2018 [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(2): 648-654.
- [12] 王晓波, 李建国, 赵春香, 等. 广州市售食品总铬和六价铬的含量分析[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(22): 86-89.
WANG XB, LI JG, ZHAO CX, *et al.* Analysis of total chromium and hexavalent chromium content in food sold in Guangzhou City [J]. Food Res Dev, 2014, 35(22): 86-89.
- [13] 童磊, 范明月, 程永红, 等. 重庆市万州区市售鲜辣椒中镉和铬污染现状评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6398-6401.
TONG L, FAN MY, CHENG YH, *et al.* Assessment of cadmium and chromium pollution in fresh chili peppers sold in Wanzhou District, Chongqing [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(18): 6398-6401.
- [14] 曾灿, 李碧涵, 刘逸文, 等. 基于 Cite Space 对近十年镉中毒研究文献的可视化分析[J]. 山东化工, 2024, 53(2): 201-205.
ZENG C, LI BH, LIU YW, *et al.* Visual analysis of cadmium poisoning research literature in the past decade based on Cite Space [J]. Shandong Chem Ind, 2024, 53(2): 201-205.
- [15] 赵生旺, 孙雷, 周延政, 等. 镉超标大米水解糖发酵生产 2-酮基葡萄糖过程中镉的迁移规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6369-6376.
ZHAO SW, SUN L, ZHOU YZ, *et al.* The migration law of cadmium during the production of 2-ketogluconic acid by hydrolysis sugar fermentation of rice with excessive cadmium content [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(19): 6369-6376.
- [16] 黎平, 刘铭, 李达圣, 等. 燃煤污染型砷中毒临床症状特征分析[J]. 中国地方病学杂志, 2000(2): 139-141.
LI P, LIU M, LI DS, *et al.* Analysis of clinical symptoms and signs of arsenic poisoning caused by coal-fired pollution [J]. Chin J Endemiol 2000(2): 139-141.
- [17] 黄飞飞, 王瑛, 张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 9039-9045.
HUANG FF, WANG Y, ZHANG N. Assessment of heavy metal pollution status and dietary exposure risk in Suzhou real estate rice industry [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [18] 郭雪梅, 黄星琳. 原子吸收光谱法在食品重金属元素检测中的应用及实践探讨[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 43-45.
GUO XM, HUANG XL. Application and practical exploration of atomic absorption spectroscopy in the detection of heavy metal elements in food [J]. Mod Food, 2023, 29(5): 43-45.
- [19] 操江飞, 袁新年, 陈持, 等. 三种消解方法比较原子荧光光谱法检测富硒米和茶中硒含量[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 312-316.
CAO JF, YUAN XN, CHEN C, *et al.* Comparison of three digestion methods for detecting selenium content in selenium rich rice and tea using

- atomic fluorescence spectroscopy [J]. *Food Addit China*, 2024, 35(5): 312–316.
- [20] 魏滨, 常通, 王韬. 电感耦合等离子体发射光谱法和电感耦合等离子体质谱法测定食品中铝结果一致性的研究[J]. *职业与健康*, 2023, 39(23): 3200–3205.
- WEI B, CHANG T, WANG T. Study on the consistency of aluminum determination in food by inductively coupled plasma emission spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Occup Health*, 2023, 39(23): 3200–3205.
- [21] 刘慧英, 占如意, 陈露婷, 等. ICP-MS 技术在食品中重金属检测的研究进展[J]. *当代化工研究*, 2023(7): 8–10.
- LIU HY, ZHAN RY, CHEN LT, *et al.* Research progress of ICP-MS technology in heavy metal detection in food [J]. *Mod Chem Res*, 2023(7): 8–10.
- [22] 石伟. 食品理化检验中微量元素检验方法分析[J]. *现代食品*, 2020(17): 216–218.
- SHI W. Analysis of trace element testing methods in food physical and chemical inspection [J]. *Mod Food*, 2020(17): 216–218.
- [23] 王凡, 王春雷. 食品药品检验前处理技术研究[J]. *食品安全导刊*, 2023(13): 162–164.
- WANG F, WANG CL. Research on pre processing technology for food and drug inspection [J]. *China Food Saf Magaz*, 2023(13): 162–164.
- [24] 劳其平, 傅朝阳. 食品中金属元素分析样品预处理技术现状及发展趋势[J]. *中国卫生工程学*, 2018, 17(4): 637–640.
- LAO QP, FU CY. The current status and development trend of sample pretreatment technology for metal element analysis in food [J]. *Chin J Pub Health Eng*, 2018, 17(4): 637–640.
- [25] 姚丽君. 两种消解方法对 ICP-MS 测定大米中铅、镉、铬、镍元素影响的研究[J]. *食品安全导刊*, 2024(1): 49–52.
- YAO LJ. Study on the influence of two digestion methods on the determination of lead, cadmium, chromium, and nickel elements in rice by ICP-MS [J]. *China Food Saf Magaz*, 2024(1): 49–52.
- [26] 杨小俊. 小麦粉中重金属检测前处理方法的比较[J]. *现代食品*, 2021(10): 186–188.
- YANG XJ. Comparison of pretreatment methods for heavy metal detection in wheat flour [J]. *Mod Food*, 2021(10): 186–188.
- [27] 李洁, 陈俊秀, 农蕊瑜, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定云南省售大米中 4 种有益元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(1): 303–308.
- LI J, CHEN JX, NONG RY, *et al.* Determination of four beneficial elements in Yunnan commercial rice by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(1): 303–308.
- [28] 郑泽阳, 贾丽, 皮媛媛, 等. 不同的消解方法对 ICP-MS 测定大米中 5 种重金属元素影响的研究[J]. *中国食品*, 2023(12): 139–141.
- ZHENG ZY, JIA L, PI YY, *et al.* Study on the influence of different digestion methods on the determination of five heavy metal elements in rice by ICP-MS [J]. *China Food*, 2023(12): 139–141.
- [29] 赵静, 宁月莲, 谢瑞龙, 等. 电感耦合等离子体质谱仪测定乳粉中铅的检出限方法优化[J]. *乳业科学与技术*, 2020, 43(3): 27–30.
- ZHAO J, NING YL, XIE RL, *et al.* Optimization of detection limit method for lead in milk powder by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 43(3): 27–30.
- [30] 魏向利, 雷用东, 马小宁, 等. 土壤重金属检测中器皿清洗方法的改进[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(18): 5737–5738, 5746.
- WEI XL, LEI YD, MA XN, *et al.* Improvement of vessel cleaning method in soil heavy metal detection [J]. *Anhui Agric Sci Technol*, 2014, 42(18): 5737–5738, 5746.
- [31] 戴礼洪, 姜红新, 李军幸, 等. 2011—2020 年农产品重金属检测能力验证结果及质量控制关键点分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1): 305–311.
- DAI LH, JIANG HX, LI JX, *et al.* Analysis of verification results and key quality control points of heavy metal detection capability in agricultural products from 2011 to 2020 [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(1): 305–311.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



徐晓伟, 硕士, 高级药品检验师, 主要研究方向为食品药品中重金属安全分析与风险监测。

E-mail: 29122043@qq.com



肖景成, 博士, 中级食品检验师, 主要研究方向为功能化纳米材料在食品安全检测中的应用。

E-mail: 29122043@qq.com