

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241118006

引用格式: 戴冠苹, 符锋, 张梓豪, 等. 直接进样测汞法检测粮食中汞含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 203–207.

DAI GP, FU F, ZHANG ZH, *et al.* Determination of mercury content in grain by direct injection method for mercury measurement [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 203–207. (in Chinese with English abstract).

直接进样测汞法检测粮食中汞含量

戴冠苹*, 符锋, 张梓豪, 赵胜男

(河南省食品和盐业检验技术研究院, 郑州 450000)

摘要: **目的** 直接进样测汞法检测粮食中汞含量。**方法** 采用直接进样测汞法对小麦、玉米、稻谷等粮食样品进行检测, 并对该方法的检出限、准确性、稳定性以及加标回收率进行分析。**结果** 当称样量为 0.1 g 时, 小麦、玉米、稻谷样品中汞的方法检出限分别为 0.070、0.075、0.085 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 均小于 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 质控样品的检测结果为 39.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 在指定值范围内; 汞的重复性检测, 相对标准偏差在 5% 以内, 满足汞检测的稳定性要求; 汞的加标回收率为 92.2%~101.4%。**结论** 与传统的汞分析方法相比, 直接进样测汞法具有操作步骤简便、重复性好、结果快速、准确等优点, 是一种值得推广的粮食中汞含量快速检测法。

关键词: 汞; 粮食检验; 直接进样测汞法

Determination of mercury content in grain by direct injection method for mercury measurement

DAI Guan-Ping*, FU Feng, ZHANG Zi-Hao, ZHAO Sheng-Nan

(Henan Province Food and Salt Industry Inspection Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: Objective To detect mercury content in grain by direct injection method for mercury measurement. **Methods** Direct injection method for mercury measurement was used to detect grain samples such as wheat, corn, and rice, and the limit of detection, accuracy, stability, and spiked recovery rate of the method were analyzed. **Results** When the sample size was 0.1 g, the limits of detection mercury in wheat, corn, and rice were 0.070, 0.075, 0.085 $\mu\text{g}/\text{kg}$, all of which were less than 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$. The detection results of the quality control sample was 39.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$, which was within the specified value range. The repeatability of mercury detection, with a relative standard deviation within 5%, met the stability requirements for mercury detection. The recovery rate of mercury spiked samples were 92.2%~101.4%. **Conclusion** Compared with traditional mercury analysis methods, direct injection method for mercury measurement has the advantages of simple operation steps, good repeatability, fast and accurate results, and is a recommended method for rapid detection of mercury content in grain.

KEY WORDS: mercury; grain detection; direct injection method for mercury measurement

收稿日期: 2024-11-18

第一作者/*通信作者: 戴冠苹(1988—), 女, 工程师, 主要研究方向为粮油食品检验。E-mail: daiguanping2010@163.com

0 引言

粮食是人类赖以生存和发展的必需品,是人类一切生命活动的能量来源,其重要性不言而喻。同时粮食安全问题也自始至终都是一个重要的问题,因为它关系到千家万户和国计民生,关系到社会和谐与稳定。但是,随着近年来工业化进程加快,越来越多的污染物裹挟着多种重金属以各种化学形态排入环境,污染到水源以及土壤。如果种植粮食作物的土地被重金属污染,将会被作物吸收,进而累积到粮食当中。人们食用被重金属污染的粮食作物后,这些进入身体的重金属会干扰人体的正常生理功能,对身体产生危害,甚至会引起死亡,因此重金属污染对粮食质量安全造成了很大威胁。这类重金属称为有毒重金属^[1-2],在有毒金属元素中,汞的毒性排在首位。

汞,又称水银,常温常压下为液态金属,是唯一主要以气态单质存在于大气中的重金属^[3]。自然界的汞主要以元素汞、无机汞和有机汞 3 种基本状态存在,其进入人体的途径主要为食物链富集^[4-7]。汞具有显著的生物毒性,通过食物进入体内,极易被消化道吸收,人体吸收的汞会分布在全身各个器官和组织,其中肝、肾、脑的含量最高。因为这些汞在生物体内无法自行降解,同时如果经常食用被重金属污染粮食制作的食物,就会在体内不断的累积,这样就会对器官和组织持续产生危害,造成汞中毒,严重影响人的身体健康^[8]。汞在体内的生物半衰期长达 70 d,在脑内更是长达 250 d,汞作为剧毒物质更容易导致脑神经系统损伤。汞中毒后出现的神经系统损伤症状,包括语言障碍、听力障碍、感觉障碍等,甚至导致瘫痪、肢体变形。同时高浓度的汞具有很强的致畸、致癌、致突变的作用,甚至导致死亡^[9]。世界卫生组织将汞列为最需要关注的重金属^[10-12]。因此,在粮食安全风险评估中,总汞是粮食中必须监测的污染物指标之一^[13-16],GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定,谷物及其制品中的汞含量不得超过 0.02 mg/kg。

目前,国内粮食中总汞的分析方法主要有原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectrometry, AFS)^[17-22]、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)^[23-27]、冷原子吸收光谱法^[28]等。AFS 使用时间久远,技术成熟,仪器成本较低,是现行测定汞应用最广泛的方法,但前处理操作烦琐,并伴有试剂污染^[29-30]。ICP-MS 的方法灵敏度、准确度高,可实现多元素同时测定,但仪器成本高,耗气量大,应用普及程度不及 AFS,且该方法存在汞离子的记忆效应干扰,测定结果稍微偏低^[31]。直接测汞法是一种新型的测汞技术,借助直接测汞仪无需对样品进行消解处理,直接固体进样,整个实验过程全部

在仪器中进行,无需离线消解,待测物无挥发损失,基体干扰少,且含汞废气经吸收液或特定的尾气吸附管吸收,进行无害化处理后排放,对环境污染小。该方法的准确度、精密度和回收率高,取样量少,测定时间短,整个测量过程小于 5 min,结果准确,重现性好。

DMA-80 直接测汞仪的工作流程为高温分解→催化吸附除杂→汞齐化捕集→原子吸收测定。仪器结构简图如图 1 所示^[32]。

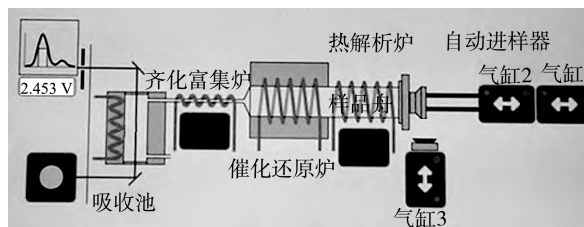


图 1 DMA-80 直接测汞仪结构简图

Fig.1 Schematic diagram of DMA-80 direct mercury analyzer structure

样品经自动进样器进样后,在通入氧气流的热解析炉中被干燥、高温分解,分解后的氧化产物经氧气流带入催化还原炉中催化还原得到蒸汽状态的汞原子,其中的杂质由催化剂吸附,蒸汽状态的汞原子由氧气流带入齐化富集炉发生金汞齐反应,并以金汞齐形式被汞齐化器捕捉收集,经高温解析释放汞,在 253.7 nm 处测定其吸光度值^[33]。

直接进样测汞法作为一种新兴检测方法,在食品、药品领域的应用已有多人研究,文献报道有测定茶叶、枸杞、中药、大米等食品或药品中的汞含量^[9,34-37],但系统全面测定常见原粮如小麦、玉米、稻谷中汞含量的文献却鲜有报道,故本研究选用玉米、稻谷、小麦等常见原粮为研究对象,通过对不同粮食样品的分析,对直接进样测汞法的方法检出限(limit of detection, LOD)、准确度、加标回收率、重现性等指标,进行了适用性评价,为粮食质量安全监管任务中总汞的检测提供的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

稻谷、小麦、玉米样品为实验室留存。

硝酸(痕量金属级,美国 Fisher Chemical 公司);汞标准溶液(GSB04-1729-2004,质量浓度 1000 μg/mL)(国家有色金属及电子材料分析测试中心);QC-442A-7 大米粉中汞质控样品(大连中食国实检测技术有限公司)。

1.2 仪器与设备

DMA-80 直接测汞仪(意大利 Milestone 公司); BLH-5700 粉碎机(浙江伯利恒仪器设备有限公司); CPA225D 分析天平(感量为 0.1 mg, 德国 sartorius 公司); UPH-III-20L 超纯水系统(西安优普仪器设备有限公司); TM-0910P 马弗炉(北京安合美诚科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 仪器条件

干燥温度 200 °C, 升温时间 10 s, 保持时间 60 s; 分解温度 650 °C, 升温时间 90 s, 保持时间 90 s, 冲洗时间 60 s; 齐化管加热温度 850 °C, 齐化管加热时间 12 s; 记录时间 30 s; 载气高纯氧气压 0.4 MPa。

1.3.2 样品处理

小麦、稻谷、玉米样品分别用粉碎机粉碎, 粒径达 425 μm 以下(40 目以上), 混合均匀, 装入洁净聚乙烯瓶中, 密封保存备用。

1.3.3 样品舟净化

将样品舟中残留的样品灰烬处理干净后, 放置于马弗炉中 800 °C 高温灼烧 30 min, 去除汞残留。使用前, 按照直接测汞仪的仪器参考条件, 先运行仪器空白, 即不放样品舟, 目的是去除仪器内的汞残留, 直到其峰高小于 0.0030 才可以使用。

1.3.4 标准曲线的制作

用 1000 mg/L 的汞标准溶液与体积分数 5% 的硝酸溶液依次稀释配制成汞质量浓度为 0、5、10、20、50、100、200 μg/L 的标准溶液。

分别吸取 0.1 mL 上述汞标准溶液于样品舟中, 按汞质量由小到大的顺序, 依次进行测定, 记录信号响应值峰高。

1.3.5 样品的测定

准确称取 0.1 g 左右(精确至 0.0001 g)样品于样品舟中, 按照 1.3.1 的仪器条件进行测定, 获得相应的信号响应值及样品的汞含量。

1.4 数据处理

每组实验重复进行 3 次, 采用 Microsoft Excel 2019 对检测数据进行分析, 计算相对标准偏差及绘制标准曲线图。

2 结果与分析

2.1 直接进样测汞法的标准曲线

标准溶液测定结果如表 1 所示, 以汞的含量为横坐标(X, ng), 以其对应的信号响应值峰高为纵坐标(Y), 绘制汞标准曲线。汞含量在 0~20.0 ng 范围内, 标准曲线方程为 $Y = -0.00101076X^2 + 0.05443371X - 0.00039197$, 相关系数 $r^2 = 0.99998$, 符合国家标准要求(不低于 0.999)。

表 1 标准溶液测定值
Table 1 Measurement value of standard solution

汞含量/ng	信号响应值峰高
0	0.0007
0.5	0.0266
1.0	0.0533
2.0	0.1022
5.0	0.2472
10.0	0.4431
20.0	0.6839

2.2 直接进样测汞法对不同粮食的方法检出限

选取汞本底值极低的稻谷、小麦、玉米样品为空白样品, 按照 1.3.2 制成合适的粒度, 采用直接测汞仪对不同粮食品种的空白样品连续测定 20 次, 获得相应的信号响应值, 计算标准偏差, 按公式(1)计算各类粮食中汞的 LOD:

$$\text{LOD} = (3 \times \text{SA}) / (k \times m) \quad (1)$$

式中: SA 为空白样品多次测得信号响应值的标准偏差; k 为标准曲线在低浓度范围内的斜率; m 为称样量, g。

按 0.1 g 称样量计算, 采用直接进样测汞法, 小麦、玉米、稻谷样品中汞的 LODs 分别为 0.070、0.075、0.085 μg/kg, 均低于 0.2 μg/kg(表 2), 满足 GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》中规定的 LOD 要求。

表 2 不同粮食样品的 LODs (μg/kg)
Table 2 LODs for different grain samples (μg/kg)

样品	LODs	国家标准规定的 LOD
稻谷	0.085	0.2
小麦	0.070	
玉米	0.075	

2.3 直接进样测汞法的准确性

本研究采用大米粉中汞含量质控样品, 其指定值为 (39.3±4.1) μg/kg, 做 3 个平行, 用直接测汞仪检测汞含量。该质控样品检测平均值为 39.42 μg/kg, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)为 0.63%, 在质控样品的指定值范围内, 可见直接进样测汞法的准确度高, 重复性好, 可以满足检测要求。

2.4 不同粮食直接进样测汞法的检测稳定性

收集不同汞元素含量及不同种类的粮食样品, 包括 3 份稻谷、3 份小麦、3 份玉米样品, 按照 1.3.2 制成合适的粒度, 每个样品做 3 个平行, 用直接测汞仪进行检测, 结果见表 3。从表中结果可以看出: 不同粮食品种, 直接进样

测汞法 3 个平行样的 RSD 均在 5% 以内, 说明直接进样测汞法能够满足不同粮食中汞检测的稳定性要求。

表 3 不同粮食样品直接进样测汞法的检测稳定性
Table 3 Stability of direct injection method for mercury measurement in different grain samples

样品	检测平均值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	RSDs/%
稻谷 1	4.0863	1.54
稻谷 2	24.8245	1.45
稻谷 3	85.4226	1.00
小麦 1	1.1064	1.28
小麦 2	15.5799	0.65
小麦 3	101.3462	0.28
玉米 1	2.5665	2.01
玉米 2	40.0391	1.35
玉米 3	124.0710	0.74

2.5 不同粮食样品直接进样测汞法的加标回收率

选取已知汞含量的稻谷、小麦、玉米样品, 各加入不同浓度梯度的汞标准溶液, 每个梯度做 3 个平行, 采用直接测汞仪进行检测, 结果见表 4。稻谷、小麦、玉米样品采用直接进样测汞法的加标回收率在 92.2%~101.4% 之间, RSDs 均小于 5%, 符合粮食中汞元素的检验要求。

表 4 不同粮食样品直接进样测汞法的加标回收率
Table 4 Recovery rates of direct injection method for mercury measurement in different grain samples

本底值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	加标量 /ng	检测平均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均回收率 /%	RSDs /%
稻谷 4.0863	1	14.2235	101.4	3.5
	5	51.8970	95.6	1.9
	10	98.0172	93.9	2.5
小麦 1.1064	1	10.9712	98.6	4.0
	5	49.5523	96.9	1.3
	10	96.8908	95.8	1.6
玉米 2.5665	1	12.6565	100.9	4.1
	5	49.6437	94.2	2.7
	10	94.7685	92.2	1.2

3 结 论

本研究以小麦、玉米、稻谷等常见原粮为对象, 对直接进样测汞法进行分析, 结果当标准溶液的汞含量为 0~20.0 ng 范围内, 标准曲线相关系数大于 0.999, 不同粮食样品的 LODs 均小于 0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 质控样品的检测结果在指定值范围内。汞的重复性检测, RSDs 在 5% 以内, 汞的加标回收率为 92.2%~101.4%。说明直接进样测汞法的 LOD、准确性、

稳定性、加标回收率均能满足实验要求, 证实了该方法测定粮食中汞元素的可行性。

与传统的汞分析方法相比, 直接进样测汞法具有操作步骤简单、无需消解、重复性好、结果快速、准确等优点, 因此该方法适用于大批量粮食中汞元素的检测, 是一种值得广泛推广的高效检测方法, 为粮食中总汞的快速检测提供实验依据。

参考文献

- [1] 张宏康, 王中媛, 许佳璇, 等. 食品中重金属检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(5): 1844-1850.
ZHANG HK, WANG ZY, XU JX, *et al.* Research progress on analysis technologies of heavy metals in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(5): 1844-1850.
- [2] 吴晓, 张良晓, 李培武, 等. 粮食中重金属检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2358-2365.
WU R, ZHANG LX, LI PW, *et al.* Research progress on analytical methods for heavy metals in grains [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(8): 2358-2365.
- [3] 王慧, 吴炜. 食品总汞测定中三种不同前处理方法的对比研究[J]. 食品安全导刊, 2024(3): 112-118.
WANG H, WU W. Comparative study of three different pretreatment methods in the determination of total mercury in food [J]. China Food Safety Magazine, 2024(3): 112-118.
- [4] 常家琪, 张小军, 梅光明, 等. 冷原子吸收法测定水产品中总汞含量[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(4): 310-314.
CHANG JQ, ZHANG XJ, MEI GM, *et al.* Determination of total mercury in aquatic products by cold atomic absorption spectrometry [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2016, 35(4): 310-314.
- [5] HOUSTON MC. Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke [J]. Journal of Clinical Hypertension, 2011, 13(8): 621-627.
- [6] CHAN TYK. Inorganic mercury poisoning associated with skin-lightening cosmetic products [J]. Clinical Toxicology, 2011, 49(10): 886-891.
- [7] FAO/WHO. Dietary exposure assessment of chemicals in foods, report of a joint FAO/WHO consultation [Z]. Maryland: FAO/WHO, 2005.
- [8] 杨杰, 王竹天, 杨大进. 食品中总汞检测方法的研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2008(4): 346-351.
YANG J, WANG ZT, YANG DJ. Progress in method of determination of total mercury in foods [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2008(4): 346-351.
- [9] 陈强, 万茜, 龚娟. 固体直接进样-测汞仪测定不同种类茶叶中的汞含量[J]. 现代食品, 2023, 29(21): 155-158.
CHEN Q, WAN Q, GONG X. Determination of mercury content in different types of tea by solid direct injection mercury analyzer [J]. Modern Food, 2023, 29(21): 155-158.
- [10] 刘学国, 刘果, 范香, 等. 汞元素高灵敏、低成本检测新方法的研究[J]. 南阳理工学院学报, 2018, 10(4): 98-104.
LIU XG, LIU G, FAN X, *et al.* High-sensitivity mercury detection method for low-cost detection [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2018, 10(4): 98-104.
- [11] 李志强, 韩俊艳, 郭宇俊, 等. 汞毒性研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(12): 64-68.
LI ZQ, HAN JY, GUO YJ, *et al.* Research progress on mercury toxicity [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(12): 64-68.
- [12] 王博, 王慧, 刘思洁. 吉林省居民膳食汞暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4908-4913.
WANG B, WANG H, LIU SJ. Assessment on dietary mercury exposure risk among residents in Jilin Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(12): 4908-4913.

- [13] 石家源, 杨会宁, 赵越超, 等. GB 5009.17—2021 食品中总汞的测定在粮食检测中的应用[J]. 粮食科技与经济, 2022, 47(4): 99–103.
SHI JY, YANG HN, ZHAO YC, *et al.* Application of GB 5009.17—2021 determination of total mercury in food in grain detection [J]. Food Science and Technology and Economy, 2022, 47(4): 99–103.
- [14] 秦祎芳, 张红云, 高敬铭, 等. 原子荧光光谱法和快速测汞仪法测定粮食中汞的对比研究[J]. 食品科技, 2020, 45(8): 282–285.
QIN YF, ZHANG HY, GAO JM, *et al.* Comparative study on the determination of mercury in grain by atomic fluorescence spectrometry and rapid mercury test [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(8): 282–285.
- [15] 李亚丽, 唐杉, 魏淑敏, 等. DMA-80 直接测汞仪测定肥料样品中总汞含量[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(3): 18–22.
LI YL, TANG S, WEI SM, *et al.* Determination of total mercury content in fertilizer samples by DMA-80 direct mercury analyzer [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(3): 18–22.
- [16] 刘锐, 梁春穗. 直接测汞法在各类食品分析中的应用研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2007(6): 974–976.
LIU R, LIANG CS. Application of method of directly determining mercury in food [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2007(6): 974–976.
- [17] 汤燕. 应用原子荧光光谱法测定茶叶及茶园土壤中汞、砷的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
TANG Y. Investigation of the determination of mercury and arsenic in tea and tea soil by atomic fluorescence spectrometry [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [18] 陈晓妹. 氢化物发生原子荧光法测定水中痕量砷和汞[J]. 理化检验(化学分册), 2003(2): 83–84.
CHEN XM. HG-AFS determination of trace amounts of arsenic and mercury in water [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2003(2): 83–84.
- [19] 汪婍娜, 舒青青, 高志杰. 微波消解-氢化物发生-原子荧光光谱法测定海产品中痕量汞[J]. 中国卫生检验杂志, 2012, 22(6): 1250–1252.
WANG ZN, SHU QQ, GAO ZJ. Determination of trace mercury in seafood by microwave digestion-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2012, 22(6): 1250–1252.
- [20] 董娜. 微波消解—氢化物发生原子荧光光度法测定大米中的汞[J]. 粮食加工, 2019, 44(6): 86–87.
DONG N. Determination of mercury contents in rice by using microwave digestion and hydride generation atomic fluorescence spectrometry [J]. Grain Processing, 2019, 44(6): 86–87.
- [21] 张艳, 王琦, 陈也然, 等. 微波消解-原子荧光光谱法测定云南食用玫瑰中重金属元素[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 185–190.
ZHANG Y, WANG Q, CHEN YR, *et al.* Determination of heavy metal elements in Yunnan edible roses by microwave digestion-atomic fluorescence spectrometry [J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 185–190.
- [22] DA-SILVA MJ, PAIM APS, PIMENTEL MF, *et al.* Determination of mercury in rice by cold vapor atomic fluorescence spectrometry after microwave-assisted digestion [J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 667(1): 43–48.
- [23] 马玲, 马清敏, 张莹, 等. ICP-MS 法同时测定香辛料中的 11 种金属[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 308–310.
MA L, MA QM, ZHANG Y, *et al.* Determination of eleven metals in spices by ICP-MS [J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 308–310.
- [24] HSIEH YJ, JIANG SJ. Determination of selenium compounds in food supplements using reversed-phase liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Microchemical Journal, 2013, 110: 1–7.
- [25] JACKSON BP, TAYLOR VF, KARAGAS MR, *et al.* Arsenic, organic foods and brown rice syrup [J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(5): 623–626.
- [26] NARUKAWA T, HIOKI A, CHIBA K. Speciation and monitoring test for inorganic arsenic in white rice flour [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(4): 1122–1127.
- [27] NACANO LR, DE-FREITAS R, BARBOSA JRF. Evaluation of seasonal dietary exposure to arsenic, cadmium and lead in schoolchildren through the analysis of meals served by public schools of Ribeirão Preto, Brazil [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health-part A-current Issues, 2014, 77(7): 367–374.
- [28] 吴振华. 冷原子吸收分光光度法测定土壤总汞的改进方法探讨[J]. 上海化工, 2017, 42(3): 32–35.
WU ZH. The improved method for determining total mercury in soil by cold atomic absorption spectrophotometry [J]. Shanghai Chemical Industry, 2017, 42(3): 32–35.
- [29] 李娜, 何霜, 李吉龙, 等. ICP-OES/ICP-MS 测定 15 种鱼肉松中的 30 种矿物质元素含量[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(18): 150–154.
LI S, HE S, LI JL, *et al.* Analysis of 30 mineral elements in 15 fish-meat tloss samples by using ICP-OES and ICP-MS [J]. Food Research and Development, 2016, 37(18): 150–154.
- [30] 赵一霖, 霍霏霖, 李吉龙, 等. 超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱/质谱法高效测定不同基质食品中 27 种矿物质元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2404–2410.
ZHAO YL, HUO PL, LI JL, *et al.* Determination of 27 elements in different food matrix by super microwave digestion coupled with inductively coupled plasma optical emission spectrometry/mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(10): 2404–2410.
- [31] PAUL MC, TOIA RF, VON-NAGY-FELSOBUKI EI. A novel method for the determination of mercury and selenium in shark tissue using high-resolution inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Spectrochimica Acta Part B-atomic Spectroscopy, 2003, 58(9): 1687–1697.
- [32] 张增坤. DMA-80 全自动测汞仪测定大米粉中总汞的方法研究[J]. 现代食品, 2022, 28(16): 196–199.
ZHANG ZK. Study on determination of total mercury in rice flour by DMA-80 automatic mercury detector [J]. Modern Food, 2022, 28(16): 196–199.
- [33] 聂鹏, 廖海伟, 何施纤, 等. DMA 80 直接测汞仪检测卷烟中的汞含量[J]. 食品工业, 2019, 40(8): 303–305.
NIE P, LIAO HW, HE SX, *et al.* The mercury concentration detection in cigarettes by DMA 80 direct mercury analyzer [J]. The Food Industry, 2019, 40(8): 303–305.
- [34] 杨建兴, 马雪梅, 李谦, 等. 直接测汞仪测定宁夏地产枸杞中总汞含量及安全性评价[J]. 农产品加工, 2023(14): 58–63.
YANG JX, MA XM, LI Q, *et al.* Determination of total mercury content and safety evaluation of wolfberry [J]. Farm Products Processing, 2023(14): 58–63.
- [35] 司敬沛, 孙鹏, 任晋源, 等. 直接测汞仪快速测定中药中总汞含量[J]. 质量与安全检验检测, 2022, 32(2): 35–38.
SI JP, SUN P, REN JY, *et al.* Rapid determination of mercury content in the traditional chinese medicines with direct mercury analyzer [J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2022, 32(2): 35–38.
- [36] 胡浩, 李咏梅, 冯礼, 等. 直接进样测汞仪测定大米中总汞含量的方法研究[J]. 湖南农业科学, 2020(8): 82–87.
HU H, LI YM, FENG L, *et al.* Study on the method of measuring total mercury content in rice by direct sampling mercury analyzer [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020(8): 82–87.
- [37] 谭炜, 盛娟, 张咪咪, 等. 直接进样测汞法测定生鲜乳中汞含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7235–7239.
TAN W, SHENG J, ZHANG MM, *et al.* Determination of mercury content in fresh milk by direct injection mercury determination [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(18): 7235–7239.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)