

# 直接进样测汞法测定不同粒径固体食品样品中总汞差异性分析

姚晓慧<sup>1,2,3</sup>, 陈绍占<sup>2,3</sup>, 陈 镇<sup>1,2,3</sup>, 刘 洋<sup>1,2,3</sup>, 刘丽萍<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 首都医科大学公共卫生学院, 北京 100069; 2. 北京市疾病预防控制中心, 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013; 3. 北京市预防医学研究中心, 北京 100013)

**摘要: 目的** 比较直接进样测汞法对不同粒径的固体食品样品中总汞测定结果的差异性, 考察其对固体样品粒径的要求。**方法** 取不同粒径的固体食品样品于镍舟上, 直接进样测定, 采用 2 种不同基质的有证标准物质进行质量控制, 用统计学方法及相对均匀度因子(homogeneity factor,  $H_E$ )进行比较分析。**结果** 实验过程中 2 种不同基质的有证标准物质的测定值均在标准值范围内, 表明测定的准确性。未过筛组大米均匀度较差, 而食用菌 A 均匀度较好可全部通过 40 目筛, 即粒径选择均在  $\leq 425 \mu\text{m}$  (或筛孔  $\geq 40$  目)时总汞含量的测定结果无显著性差异( $P>0.05$ ), 且不同品牌测汞仪测定结果具有较好的一致性。**结论** 直接进样测汞法测定固体食品样品的方法简单可靠, 但因对样品均匀性有较高的要求, 需样品粒径  $\leq 425 \mu\text{m}$  (或筛孔  $\geq 40$  目)时才能保证测定结果的准确性。

**关键词:** 直接测汞法; 总汞; 粒径; 均匀性

## Differential analysis of total mercury in solid food samples with different particle sizes by direct injection mercury determination

YAO Xiao-Hui<sup>1,2,3</sup>, CHEN Shao-Zhan<sup>2,3</sup>, CHEN Zhen<sup>1,2,3</sup>, LIU Yang<sup>1,2,3</sup>, LIU Li-Ping<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Public Health, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 2. Beijing Key Laboratory of Diagnostic and Traceability Technologies for Food Poisoning, Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China; 3. Center for Preventive Medicine Research, Beijing 100013, China)

**ABSTRACT: Objective** To compare the difference of the direct mercury injection method for the determination of total mercury in solid food samples with different particle sizes and to investigate its requirements for the particle sizes of solid samples. **Methods** Solid food samples with different particle sizes were directly injected into nickel boat for determination. Two kinds of certified reference materials with different matrices were used for quality control. Statistical methods and relative homogeneity factor ( $H_E$ ) were used for comparative analysis. **Results** During the experiment, the measured values of the certified reference materials of the 2 kinds of different substrates were all within the standard value range, indicating the accuracy of the measurement. The uniformity of rice in non sieving group was poor, while that of edible fungus A was good, which could all pass through 40 mesh sieve, that was, when the particle size selection was less than or equal to  $425 \mu\text{m}$  (or the sieve  $\geq 40$  mesh), there was no significant difference in the determination results of total mercury content ( $P>0.05$ ), and the determination results of

\*通信作者: 刘丽萍, 教授, 主要研究方向为与健康相关的有害物质及营养成分分析。E-mail: llp9312@163.com

\*Corresponding author: LIU Li-Ping, Professor, Beijing Center for Disease Prevention and Control, No 16, Hepingli Middle Street, Dongcheng District, Beijing 100013, China. E-mail: llp9312@163.com

different brands of mercury meters had good consistency. **Conclusion** The direct sample mercury measurement method is simple and reliable for solid food samples. However, due to the higher requirements for sample uniformity, the accuracy of the measurement results can only be guaranteed when the sample size is less than or equal to 425  $\mu\text{m}$  (or the sieve is more than 40 mesh).

**KEY WORDS:** direct mercury determination; total mercury; particle size; uniformity

## 0 引言

汞是自然界中分布广且对人类和环境最具危险性的元素之一。汞及其化合物在人体内具有相当高的蓄积毒性,一旦被人体吸收,会对健康造成极大威胁<sup>[1]</sup>,长期暴露于汞环境会对脑部发育造成严重影响<sup>[2]</sup>。大米作为我国日常饮食量最大的主食之一,若受到汞的污染将严重危害人体健康<sup>[3]</sup>。野生菌被认为是具有极高营养价值的健康食品备受消费者的喜爱<sup>[4-5]</sup>,但也易于从土壤及环境中吸收并富集重金属<sup>[6-7]</sup>,尤其是汞。

我国 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》对食品中的汞含量进行了限量,为食品中汞的监督管理和分析检测提供了依据。目前总汞的测定方法主要有原子荧光光谱法(atomic fluorescence spectroscopy, AFS)<sup>[8-9]</sup>、冷原子吸收光谱法(cold vapor atomic fluorescence spectrometry, CV-AFS)<sup>[10-11]</sup>和电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)<sup>[12]</sup>等,但这些方法都需要对样品进行前处理,多采用酸消解的方式,其过程烦琐。直接进样测汞法无需进行样品前处理,自动化程度高、稳定性好、操作简便、灵敏度高,可有效减少可能的误差,已成为总汞测定的热点方法<sup>[13-14]</sup>。但直接进样测汞法取样量相对较少,对样品的均匀性要求较高,一般采用粒径或筛孔来描述固体样品的粉碎程度,即粒径 425  $\mu\text{m}$  (相当于筛孔 40 目)、粒径 250  $\mu\text{m}$  (相当于筛孔 60 目)、粒径 150  $\mu\text{m}$  (相当于筛孔 100 目),粒径越小说明样品粉碎程度越好,样品越均匀。虽然直接进样测汞法在食品安全中得到广泛应用,但对于预处理过程中样品粒径的考察鲜少有报道。

本研究采用直接进样测汞法对经过大量筛查选出的 2 个汞含量超标的食品样品(大米和食用菌 A)进行检测,研究不同粒径对总汞测定结果的影响,以期采用直接进样测汞法测定总汞时样品的预处理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

DMA-80 直接进样测汞仪(意大利 Milestone 公司); BDHg-60 全自动直接进样测汞仪(北京宝德仪器公司); AL204 电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司); Millipus 2150

型超纯水处理系统(美国 Millipore 公司); 8010s 型粉碎机(美国 Waring 公司); 标准筛: 40 目筛(孔径 425  $\mu\text{m}$ )、60 目筛(孔径 250  $\mu\text{m}$ )、100 目筛(孔径 125  $\mu\text{m}$ ) (浙江省上虞县沙筛厂)。

### 1.2 材料与试剂

经实验筛选出汞含量超标的固体食品样品(大米; 食用菌 A 为某一干野生食用菌)。

汞标准储备溶液(1000 mg/L, 中国计量科学研究院); 鸡肉成分分析标准物质(GBW10018)、紫菜成分分析标准物质(GBW10023) (地球物理地球化学勘查研究所); 硝酸(优级纯, 美国 Merker 公司); 重铬酸钾(分析纯, 广州化学试剂厂); 超纯水(电阻率 18.2  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ , 实验室自制)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备方法

取大米和经 60  $^{\circ}\text{C}$  烘箱烘干 30 min 的食用菌 A 样品, 用粉碎机粉碎均匀, 将样品分 4 等份, 粉碎好未过筛的样品记为  $M_0$ , 过 40 目筛的样品记为  $M_{40}$ , 过 60 目筛的样品记为  $M_{60}$ , 过 100 目筛的样品记为  $M_{100}$ , 分别装入洁净聚乙烯塑料瓶中, 于阴凉通风处密封保存备用。

#### 1.3.2 仪器工作参数

DMA-80 直接进样测汞仪仪器参数为: 干燥温度 250  $^{\circ}\text{C}$ ; 干燥时间 60 s; 分解温度 700  $^{\circ}\text{C}$ ; 分解时间 120 s; 齐化温度 900  $^{\circ}\text{C}$ ; 齐化分解时间 12 s; 载气流量 200 mL/min。

BDHg-60 全自动直接进样测汞仪仪器参数为: 干燥温度 275  $^{\circ}\text{C}$ ; 干燥时间 70 s; 分解温度 700  $^{\circ}\text{C}$ ; 分解时间 180 s; 齐化温度 800  $^{\circ}\text{C}$ ; 齐化分解时间 15 s; 载气流量 350 mL/min。

#### 1.3.3 标准溶液的制备

汞标准溶液配制: 准确吸取质量浓度为 1000 mg/L 汞标准储备液 10 mL 于 100 mL 容量瓶中, 用 0.5 g/L 重铬酸钾的 5%硝酸溶液稀释并定容至刻度, 混匀, 配制成 100 mg/L 汞标准中间液; 将此溶液再逐级稀释得到 10 mg/L 汞标准使用液。

汞标准工作溶液配制: 准确吸取质量浓度为 10 mg/L 汞标准使用液, 用含 0.5 g/L 重铬酸钾的 5%硝酸溶液逐级稀释成质量浓度为 0、10、50、100、200、300 和 400  $\mu\text{g}/\text{L}$  的低浓度系列标准溶液; 准确吸取质量浓度为 100 mg/L 汞

标准中间液,用含 0.5 g/L 重铬酸钾的 5%硝酸溶液逐级稀释成质量浓度为 0.4、0.8、1.0、2.0、3.0、4.0 和 6.0 mg/L 的高浓度系列标准溶液。

### 1.3.4 测定方法

取粉碎过筛后不同粒径的样品上机测定,测定前开机预热 20 min,将样品舟进行空烧,以降低汞残留,使空白吸光度达到 0.0003。分别准确称取大米 0.15 g 和食用菌 A 0.05 g 于样品舟上,置于自动进样器中,按仪器设定条件进行测定,采用有证标准物质进行质量控制。

### 1.3.5 统计分析方法

大米和食用菌 A 中总汞含量测定结果采用 EXCEL 16.0 及 SPSS 20.0 对数据进行录入及分析,对符合正态分布及方差齐性的数据采用单因素方差分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)进行统计推断,对不符合正态分布及方差齐性的数据则采用 Kruskal-Wallis  $H$  检验进行统计推断。以均数 $\pm$ 标准差进行描述。检验水准  $\alpha=0.05$ (双侧)。采用相对均匀度因子(homogeneity factor,  $H_E$ )<sup>[15]</sup>对样品的均匀度进行评价,  $H_E=RSD*m^{1/2}$  式中 RSD 为  $n$  个测定值的相对标准偏差(relative standard deviation),%;  $m$  为  $n$  个样品的平均质量,mg。

## 2 结果与分析

### 2.1 取样量的确定

由于样品进样量有限,固体样品的最大容量为 1.5 g,取样量的多少应根据汞含量和样品基质特点确定,取样量过多会加剧样品中汞对催化管及齐化管的损害,缩短其使用寿命;取样量过少缺乏代表性,测量误差较大<sup>[16-17]</sup>。同时由于汞存在较强的记忆效应,高浓度样品测定后会对低浓度样品的测定造成影响。为降低记忆效应,对于高浓度样品,在保证均匀性的同时要减少取样量<sup>[18]</sup>。考察了取样量在 0.01~0.15 g 范围内的测定结果,结果表明当取样量小于 0.05 g 时,样品测定结果的重复性较差;如大米样品汞含量较低,实验表明需采用较大的取样量方可保证测定的准确性和重复性,同时兼顾样品的燃烧充分,最终取样量为 0.15 g 左右;而食用菌 A 样品汞含量较高,取样量太低不能保证测定的重复性,当最终取样量为 0.05 g 左右时,即可满足测定的要求。

### 2.2 样品舟空白的控制

样品舟分为镍舟及石英舟 2 种,固体样品一般采用镍舟。为减小样品舟对测定结果的影响,进行样品测定前需对样品舟进行空烧,使吸光度低于 0.0003,以降低汞残留,每次测定结束及高浓度样品测定后,应清除灰烬用超纯水进行清洗并灼烧后,方可继续测定<sup>[19-20]</sup>。

### 2.3 质量控制

采用 2 种不同基质的有证标准物质进行质量控制,结

果见表 1。2 个质控样品总汞的测定值均在给定的标准值范围内,说明测定方法的准确性。

表 1 总汞含量的标准物质测定结果( $n=5$ )

Table 1 Determination results and value of certified reference materials ( $n=5$ )

标准参考物质	测定值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	标准值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
GBW10018 鸡肉	4.0 $\pm$ 0.3	3.6 $\pm$ 1.5
GBW10023 紫菜	16 $\pm$ 0.3	16 $\pm$ 4.0

### 2.4 测定结果

采用优化好的方法对筛选出的大米和食用菌 A 进行测定,结果见表 2。不同粒径大米的总汞含量范围为 19.0~28.5  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,不同粒径食用菌 A 的总汞含量范围为 478.6~511.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中谷物中总汞的限量标准 0.02 mg/kg 及食用菌中总汞的限量标准 0.1 mg/kg,可知筛选出的大米和食用菌 A 中的总汞浓度远高于限值标准,用此样品来考察粒径对测定结果的影响有较大的实用价值。

对实验样品平行测定 7 次,计算相对标准偏差,以考察测定结果的重复性。结果表明除大米  $M_0$  组  $RSD>5\%$  外,大米和食用菌 A 其他组的  $RSD$  均小于 5%,说明除大米  $M_0$  组均匀性较差外,其他组别的精密度较好。

表 2 DMA-80 直接测汞仪测定大米及食用菌 A 中总汞及相对均匀度因子结果( $n=7$ )

Table 2 Determination of total mercury and relative uniformity factor in rice and edible fungus A by DMA-80 direct mercury meter ( $n=7$ )

目数	测定值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	平均称样量/mg	相对均匀度因子( $H_E$ )	RSD/%
大米 $M_0$	23.1 $\pm$ 3.4	0.150	5.8	14.9
大米 $M_{40}$	23.9 $\pm$ 0.7	0.153	1.1	2.8
大米 $M_{60}$	24.1 $\pm$ 0.1	0.165	0.2	0.5
大米 $M_{100}$	25.1 $\pm$ 0.5	0.153	0.7	1.9
食用菌 A $M_0$	495.7 $\pm$ 4.5	0.050	0.2	0.9
食用菌 A $M_{40}$	492.9 $\pm$ 4.5	0.050	0.2	0.9
食用菌 A $M_{60}$	494.2 $\pm$ 11.4	0.049	0.5	2.3
食用菌 A $M_{100}$	492.9 $\pm$ 3.4	0.051	0.2	0.7

#### 2.4.1 不同粒径对总汞含量测定的影响

采用 SPSS 20.0 对表 2 中大米和食用菌 A 的总汞测定结果进行统计分析,并采用相对均匀度因子( $H_E$ )进行样品均匀度评价。

对大米总汞含量的测定值进行正态分布及方差齐性

检验后, 选用 Kruskal-Wallis H 检验对大米不同粒径中的总汞含量进行分析, 结果见表 3~5。可知差异有统计学意义, 即  $M_0$ 、 $M_{40}$ 、 $M_{60}$ 、 $M_{100}$  之间存在显著性差异( $P<0.05$ )。多组之间的两两比较见表 6, 结果表明仅  $M_0$  与  $M_{100}$  两组之间存在显著性差异( $P<0.05$ ), 其余各组间均无显著性差异( $P>0.05$ )。相对均匀度因子仅  $M_0$  组  $H_E>5$ , 由此可知大米未经过筛组  $M_0$  均匀度较差, 从而对测定结果造成影响。因此需将大米粉碎至粒径 $\leq 425 \mu\text{m}$  (或筛孔 $\geq 40$  目)才能保证测定结果的准确性。

表 3 大米方差齐性检验  
Table 3 Homogeneity test of variance of rice

	Levene 统计量	自由度 1	自由度 2	P 值
测定值	12.019	3	24	0.000

表 4 大米正态分布检验  
Table 4 Test of normal distribution of rice

组别	统计量	自由度	P 值
$M_0$	0.860	7	0.153
$M_{40}$	0.922	7	0.488
$M_{60}$	0.870	7	0.187
$M_{100}$	0.921	7	0.476

表 5 大米 Kruskal-wallis H 检验统计  
Table 5 Kruskal-Wallis H test statistics for rice

统计量	取值
$\chi^2$	9.819
自由度	3
P 值	0.020

表 6 多个样本的两两比较  
Table 6 Pairwise comparison of multiple samples

样本 1-样本 2	统计量	P 值
$M_0$ - $M_{40}$	-1.214	1.000
$M_0$ - $M_{60}$	-4.357	1.000
$M_0$ - $M_{100}$	-12.429	0.027
$M_{40}$ - $M_{60}$	-3.143	1.000
$M_{40}$ - $M_{100}$	-11.214	0.062
$M_{60}$ - $M_{100}$	-8.071	0.390

食用菌 A 总汞含量的测定值经正态分布检验和方差齐性检验后, 选用 Kruskal-Wallis H 检验进行分析, 结果见表 7~9。可知食用菌 A 4 组中总汞含量之间的差异无统计学意义( $P>0.05$ ), 即  $M_0$ 、 $M_{40}$ 、 $M_{60}$ 、 $M_{100}$  之间不存在显著性差异。通过相对均匀度因子  $H_E<5$  可知此食用菌样品均匀度较好, 同时在其过筛过程中发现, 研磨后未过筛的  $M_0$  样品可全部通过 40 目筛, 说明样品粒径均 $\leq 425 \mu\text{m}$ 。因此将食用菌 A 样品粉碎至粒径 $\leq 425 \mu\text{m}$  (或筛孔 $\geq 40$  目)即可保证测定结果的准确性。

表 7 食用菌 A 方差齐性检验  
Table 7 Homogeneity test of variance of edible fungus A

	Levene 统计量	自由度 1	自由度 2	P 值
测定值	4.096	3	24	0.018

表 8 食用菌 A 正态性检验  
Table 8 Test of edible fungus A normality

组别	统计量	自由度	P 值
$M_0$	0.929	7	0.538
$M_{40}$	0.793	7	0.035
$M_{60}$	0.978	7	0.949
$M_{100}$	0.816	7	0.058

表 9 Kruskal-wallis H 检验统计  
Table 9 Statistics of Kruskal-Wallis H test

统计量	测定值
$\chi^2$ 值	2.120
自由度	3
P 值	0.548

#### 2.4.2 2 种直接进样测汞仪结果比较

选择大米和食用菌 A 的  $M_{40}$  组, 采用国产品牌 BDHg-60 测汞仪与进口品牌 DMA-80 测汞仪进行测定, 对测定结果进行比较, 结果见表 10。选用配对  $t$  检验对结果进行统计分析, 结果表明 2 种不同品牌测汞仪大米和食用菌 A  $M_{40}$  组的测定结果无统计学差异( $P>0.05$ ), 即 2 种品牌仪器总汞测定结果一致性很好。

### 3 结 论

本研究选取了汞含量较高的 2 个固体食品样品大米

和食用菌 A 为实验材料,采用直接进样测汞法对不同粒径大米和食用菌 A 中总汞含量进行测定,通过统计学分析及相对均匀度因子进行综合评价。研究结果表明采用直接进样测汞法对于固体样品进行测定时,样品粒径选择  $\leq 425 \mu\text{m}$  (或筛孔  $\geq 40$  目)才可保证结果准确可靠,同时选用的国产和进口 2 种品牌测汞仪测定结果一致性较好。本研究结果为直接进样测汞法测定固体样品中总汞含量的预处理提供了数据支持及参考依据。

表 10 40 目样品 DMA-80 测汞仪与 BDHg-60 测汞仪方法比对( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

Table 10 Comparison of DMA-80 mercury measuring instrument and BDHg-60 mercury measuring instrument for 40 mesh samples ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

次数	DMA-80		BDHg-60	
	大米	食用菌 A	大米	食用菌 A
1	24.14	490.7	23.93	487.3
2	25.12	489.2	23.54	493.4
3	23.58	497.1	23.51	495.9
4	23.10	488.5	23.46	495.4
5	24.10	497.5	23.60	490.9
6	23.65	498.3	23.92	494.2
7	23.45	489.1	24.05	496.7
平均值	23.88	492.9	23.72	493.4
RSD/%	2.8	0.9	1.0	0.7

## 参考文献

- ZHAO X, MA L, QU P, *et al.* Total mercury and methylmercury in Chinese rice and dietary exposure assessment [J]. *Food Addit Contam Part B Surveill*, 2020, 13(2): 148–153.
- KIM JH, LEE SJ, KIM SY, *et al.* Association of food consumption during pregnancy with mercury and lead levels in cord blood [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 563-564: 118–124.
- ZHU DW, HAN JC, WU SZ. The bioaccumulation and migration of inorganic mercury and methylmercury in the rice plants [J]. *Polish J Environ Stud*, 2017, 26(4): 1905–1911.
- RACZ L, PAPP L, PROKAI B, *et al.* Trace element determination in cultivated mushrooms: An investigation of manganese, nickel, and cadmium intake in cultivated mushrooms using ICP atomic emission [J]. *Microchem J*, 1996, 54(4): 444–451.
- WANG XM, ZHANG J, WU LH, *et al.* A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China [J]. *Food Chem*, 2014, 151: 279–285.
- KALAC P, SVOBODA L. A review of trace element concentrations in edible mushrooms [J]. *Food Chem*, 2000, 69: 273–281.
- LIU B, HUANG Q, CAI HJ, *et al.* Study of heavy metal concentrations in wild edible mushrooms in Yunnan province, China [J]. *Food Chem*, 2015, 188: 294–300.
- 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 Sci Technol*, 2020, 45(8): 282–285.
- 高向阳. 原子荧光双标准夹心法快速测定食品中的汞[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(2): 535–539.
- GAO XY. Rapid determination of mercury in food by atomic fluorescence with double standard sandwich method [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(2): 535–539.
- 岳中慧, 张鑫. 催化热解-冷原子吸收分光光度法测定大米中的汞含量[J]. *化学分析计量*, 2019, 28(1): 88–90, 98.
- YUE ZH, ZHANG X. Determination of mercury in rice by cold atomic absorption spectrometry [J]. *Chem Anal Meter*, 2019, 28(1): 88–90, 98.
- 潘晓东, 吴平谷, 韩见龙. 冷原子吸收光谱法测定鱼体内不同组织中的汞含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2012, 48(3): 357, 359.
- PAN XD, WU PG, HAN JL. Determination of mercury in different tissues of fish by cold atomic absorption spectrometry [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2012, 48(3): 357, 359.
- 李琼, 林毅韵, 李樾, 等. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱法与测汞仪法测定茶叶中总汞含量的比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(13): 4261–4265.
- LI Q, LIN YY, LI L, *et al.* Comparison of determination of total mercury content in tea by ultra microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry and mercury vapourmeter method [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(13): 4261–4265.
- 章锦涵, 蔡展帆, 周忆莲, 等. 直接测汞仪测定食品中总汞[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(13): 4119–4124.
- ZHANG JH, CAI ZF, ZHOU YL, *et al.* Determination of total mercury in food by direct mercury analyzer [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(13): 4119–4124.
- 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 Agric Sci*, 2020, (8): 82–87.
- KEMPENAERS L, JANSSENS K, VINCZE L, *et al.* A Monte Carlo model for studying the microheterogeneity of trace elements in reference materials by means of synchrotron microscopic X-ray fluorescence [J]. *Anal Chem*, 2003, 18(4): 350–357.

- [16] 蔡文华, 胡曙光, 苏祖俭, 等. 直接测汞仪法测定婴幼儿配方奶粉及辅食中的汞含量[J]. 华南预防医学, 2015, 41(5): 473-476.  
CAI WH, HU SG, SU ZJ, *et al.* Determination of mercury content in infant formula milk powder and supplementary food by direct mercury meter [J]. South China J Prev Med, 2015, 41(5): 473-476.
- [17] 张妮娜, 王小艳, 刘丽萍, 等. 直接测汞仪法快速测定婴幼儿配方乳粉中汞[J]. 卫生研究, 2015, 44(1): 129-131.  
ZHANG NN, WANG XY, LIU LP, *et al.* Rapid determination of mercury in infant formula milk powder by direct mercury meter [J]. Hyg Res, 2015, 44(1): 129-131.
- [18] 曾云军, 周斌, 陈俊旭, 等. 测汞仪测定稻谷及其制品中总汞含量研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(6): 63-66.  
ZENG YJ, ZHOU B, CHEN JX, *et al.* Study on determination of total mercury content in rice and its products by mercury meter [J]. Cere Oils Food Sci Technol, 2016, 24(6): 63-66.
- [19] 赵飞蓉. 人发中总汞的直接测定方法研究[J]. 微量元素与健康研究, 2017, 34(3): 65-67.  
ZHAO FR. Study on direct determination of total mercury in human hair [J]. Trace Elem Health, 2017, 34(3): 65-67.
- [20] 刘丽萍, 张妮娜, 李筱薇, 等. 直接测汞仪测定食品中的总汞[J]. 中国食品卫生杂志, 2010, 22(1): 19-23.  
LIU LP, ZHANG NN, LI XW, *et al.* Direct mercury measuring instrument to determine total mercury in food [J]. Chin J Food Hyg, 2010, 22(1): 19-23.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



姚晓慧, 硕士研究生, 主要研究方向为与营养相关的元素分析。  
E-mail: 14753408216@163.com



刘丽萍, 教授, 主要研究方向为与健康相关的有害物质及营养成分分析。  
E-mail: llp9312@163.com