

# 混酸体系-四级杆碰撞反应池-ICP/MS 法测定 含硅类食品添加剂中的铅和砷

高喜凤, 董瑞, 于文江, 赵发, 张寒霜, 韩晓晓, 刘艳明\*

(山东省食品药品检验研究院, 国家市场监管重点实验室(肉及肉制品监管技术), 山东省特殊医学用途配方食品质量控制工程技术研究中心, 山东济南 250101)

**摘要:** 该文建立了一种混酸体系-四级杆碰撞反应池-ICP/MS法(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP/MS)测定含硅类食品添加剂中铅、砷的方法。样品用氢氟酸-盐酸-硝酸组成的混酸体系进行微波消解前处理, 采用四级杆碰撞反应池-ICP/MS法进行铅、砷的同时测定, 选取  $Pb^{208}$ 、 $As^{75}$  作为测定目标元素,  $Bi^{209}$ 、 $Ge^{72}$  做相应的内标元素, 应用碰撞/反应池技术、氦气动能歧视(Kinetic Energy Discrimination, KED)模式进行分析检测。铅、砷在 0.000 5~0.100 0  $\mu\text{g/mL}$  范围内线性关系良好,  $r^2$  均大于 0.999。对样品进行加标回收验证, 铅、砷的回收率分别为 92.0%~107.0%和 94.0%~104.0%, 相对标准偏差(Relative Standard Deviations, RSDs)分别为 2.49%、1.68%, 铅、砷的检出限分别为 0.003 和 0.002 mg/kg。该方法具有高的准确度、灵敏度、精密度和很小的干扰性等优点, 适合测定含硅类食品添加剂中的铅、砷, 可用来进行含硅类食品添加剂的质量监控和安全评价。

**关键词:** 混酸体系; 含硅类食品添加剂; 动能歧视模式; 铅; 砷

文章编号: 1673-9078(2023)05-312-317

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0638

## Determination of Lead and Arsenic in Silicon-containing Food Additives by a Mixed Acid System-quadrupole Collision Reaction Cell-ICP/MS Method

GAO Xifeng, DONG Rui, YU Wenjiang, ZHAO Fa, ZHANG Hanshuang, HAN Xiaoxiao, LIU Yanming\*

(Shandong Institute for Food and Drug Control, Key Laboratory of Supervising Technology for Meat and Meat Products for State Market Regulation, Shandong Research center of Engineering and Technology for Quality Control of Food for Special Medical, Jinan 250101, China)

**Abstract:** A mixed acid system-quadrupole collision reaction cell-ICP/MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP/MS) method for determination of lead and arsenic in silicon-containing food additives was set up. Samples were pretreated by microwave digestion with a mixed hydrofluoric acid-hydrochloric acid-nitric acid system, then the lead and arsenic were simultaneously determined by the quadruple collision cell-ICP/MS method, with  $Pb^{208}$  and  $As^{75}$  as the target elements for determination,  $Bi^{209}$  and  $Ge^{72}$  as the corresponding internal standard elements, and the collision/reaction cell technology and helium kinetic energy discrimination (KED) mode for analysis and detection. Lead and arsenic had a good linear relationship in the range of 0.000 5~0.100 0  $\mu\text{g/mL}$  with  $r^2$  greater than 0.999. The samples were subjected to standard addition recoveries experiments, and the spiked recoveries of lead and arsenic were 92.0%~107.0% and 94.0%~104.0%, respectively. The samples were spiked and recovered to verify that the recoveries of lead and arsenic were 2.49% and 1.68%, respectively. The detection limits of lead and arsenic were 0.003 mg/kg and 0.002 mg/kg, respectively. This method had advantages in terms of high accuracy, high sensitivity, high precision and little interference, which is suitable for the determination of lead and arsenic in silicon-containing food additives, as well as quality monitoring and safety evaluation of silicon-containing food additives.

引文格式:

高喜凤,董瑞,于文江,等.混酸体系-四级杆碰撞反应池-ICP/MS 法测定含硅类食品添加剂中的铅和砷[J].现代食品科技,2023,39(5):312-317.

GAO Xifeng, DONG Rui, YU Wenjiang, et al. Determination of lead and arsenic in silicon-containing food additives by a mixed acid system-quadrupole collision reaction cell-ICP/MS method [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 312-317.

收稿日期: 2022-05-20

作者简介: 高喜凤(1983-),女,硕士,高级工程师,研究方向:食品中元素分析检测, E-mail: 565373537@qq.com

通讯作者: 刘艳明(1981-),女,博士,研究员,研究方向:食品安全检查与科研, E-mail: msymliu@163.com

**Key words:** mixed acids system; food additives containing silicon; kinetic energy discrimination mode; lead; arsenic

食品添加剂的广泛应用使人类的饮食生活更加丰富多彩,已成为现代食品工业不可或缺的一部分,含硅类食品添加剂也在人类生活中扮演着重要角色。其中,GB 2760-2014《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》规定,可用于食品中的含硅类食品添加剂主要有二氧化硅、硅酸镁、硅酸钙、聚二甲基硅氧烷及其乳液,同时也规定了其适用范围及最大使用量。二氧化硅、硅酸镁、硅酸钙由于具有颗粒细微、松散多孔等性质,可以阻隔食品颗粒表面液滴,保持其松散或自由流动,因此常作为抗结剂用于食品中,防止其聚集结块<sup>[1-4]</sup>。聚二甲基硅氧烷及其乳液具有防水性好、黏度随温度变化小、疏水性好等优良的物理、化学性质,常作为产品消泡剂、脱模剂等,广泛应用于食用油脂、肉制品等产品的加工过程中<sup>[5]</sup>。铅、砷是非常常见的重金属污染物,在自然界中广泛存在,食品添加剂在生产过程中所使用的原料容易受到铅、砷的污染,造成铅、砷含量过高。铅是毒性最大的重金属之一,会损伤人体神经系统、血液系统和生殖系统,严重危害人体健康<sup>[6-9]</sup>,所以国家标准中对各类食品添加剂中铅的含量都有严格的限量要求,因此对食品添加剂中铅的测定极其必要。砷及砷的化合物具有很高的毒性,长期接触人体,会导致细胞和毛细血管中毒,甚至诱发皮肤癌、肝癌等重大疾病<sup>[10-12]</sup>,因此在食品添加剂的安全指标中砷被列为重点监测的元素之一。检测食品添加剂中铅、砷的含量水平,是控制人体铅、砷摄入量及其危害的重要预防措施。

含硅类食品添加剂的产品标准 GB 1886.62-2015《食品添加剂硅酸镁》、GB 1886.90-2015《食品添加剂硅酸钙》中明确了铅的测定方法及限量要求,GB 25576-2010《食品添加剂二氧化硅》、GB 30612-2014《食品添加剂聚二甲基硅氧烷及其乳液》中明确了铅、砷的测定方法及限量要求。GB 30612-2014 中对聚二甲基硅氧烷及其乳液检测铅引用的是 GB 5009.12-2017《食品中铅的测定》干法灰化的前处理方法,砷的测定引用的是 GB 5009.11-2014《食品中总砷及无机砷的测定》干法灰化的前处理方法,2020 年实施的 1 号修改单中铅的检验方法改为 GB 5009.75-2014《食品添加剂中铅的测定》,砷的检验方法改为 GB 5009.76-2014《食品添加剂中砷的测定》。GB 1886.62-2015 中铅的检验方法规定的是 GB 5009.75。GB 25576-2010 中铅、砷的前处理方法为盐酸加热后,过滤、洗涤、定容的方法,然后用原子荧光分光光度法进行测定。GB 1886.90-2015 中铅的前处理方法也是采用盐酸加热

后,过滤、洗涤、定容的方法,然后用火焰原子吸收光度计进行单点比较。原子吸收光谱法、原子荧光光谱法测定铅检出限高<sup>[13-18]</sup>、易受仪器稳定性、实验条件的影响,导致测定结果出现偏差,原子荧光光谱法测定砷操作复杂、基体的干扰影响大、检出限高、准确性低。从上述可以看出产品标准中规定含硅类食品添加剂中铅、砷的前处理方法均不能把样品消化成透明溶液,导致测定结果偏差,不能准确测定食品添加剂中的铅、砷。

ICP/MS 法具有检出限低、线性范围宽、能够进行多元素同时测定等优势,是国际上普遍认可的食品中重金属元素测定的重要方法,被广泛地应用于食品中重金属元素的检测中<sup>[19,20]</sup>。文献中也多有应用 ICP/MS 法进行食品添加剂中铅、砷的相关报道<sup>[21,22]</sup>,但是由于含硅类食品添加剂性质的特殊性,普通的消解方法很难将样品前处理完全,导致测定结果有偏差,不能准确测定铅砷。目前我国很少有对含硅类食品添加剂中铅、砷测定的相关报道,为了能够准确测定含硅类食品添加剂中铅、砷,本研究建立了氢氟酸-盐酸-硝酸组成的混酸体系消解含硅类食品添加剂,可将样品消化处理成澄清透明的溶液,保证了后续测定的准确性。因此本研究采用氢氟酸-盐酸-硝酸混酸体系前处理含硅类食品添加剂,电感耦合等离子体质谱法上机测定,是对国家标准食品添加剂中铅、砷的测定方法的补充和改进,能够准确地测定含硅类食品添加剂中的铅、砷含量。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

盐酸、硝酸、 $\rho=30\%$ 的过氧化氢均为优级纯试剂,上海国药集团;氢氟酸(电子级),多氟多新材料股份有限公司;铅标准溶液、砷标准溶液(1 000  $\mu\text{g/mL}$ ,中国计量科学研究院);内标溶液(1 000  $\mu\text{g/mL}$ ,含有 Sc、Ge、In、Bi),美国 Agilent 公司;调谐液(10  $\mu\text{g/mL}$ ,含有 Ce、Co、Li、Y),美国 Agilent 公司;标准物质大葱(编号 GBW(E)10049),地球物理化学勘察研究所;二氧化硅(纯度 $\geq 90\%$ ),青岛博瑞特硅能科技有限公司;聚二甲基硅氧烷及其乳液,内蒙古伊利集团;硅酸镁(纯度:99%)、硅酸钙(纯度:98%)均购自国药集团化学试剂有限公司。硝酸用亚沸磷酸纯化仪纯化后使用。

## 1.2 仪器与设备

Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪, 美国 Agilent 公司; Mars 6 微波消解仪, 美国 CEM 公司; Advantage A10 超纯水机, 美国 Millipore 公司; MS 204S 电子天平 (精度为 0.1 mg), 瑞士 METTLER TOLEDO 公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 样品前处理

准确称取试样 0.2~0.6 g 置于微波消解罐内, 向其中加入 4 mL HCl、5 mL HF、2 mL HNO<sub>3</sub> 溶液, 设定微波消解程序 (由室温升至 120 °C, 升温时间为 10 min, 120 °C 保持 5 min, 由 120 °C 升至 160 °C, 升温时间为 5 min, 160 °C 保持 5 min, 然后由 160 °C 升至 190 °C, 升温时间为 10 min, 190 °C 保持 30 min, 最后降至室温 18~25 °C), 然后 160 °C 赶酸, 近干时, 加入 1 mL HCl 继续赶酸以使 HF 能够更好的赶出, 减少对仪器的损害, 最后用超纯水定容至 50 mL 容量瓶。

### 1.3.2 仪器工作条件

射频功率 1 500 W; 雾化室温度 2 °C; 氦气流量 5.0 mL/min; 等离子体流速 15.0 L/min; 载气流量 1.1 L/min; 辅助气流量 1.0 L/min; 积分时间 0.3 s。氦气动能歧视 (Kinetic Energy Discrimination, KED) 模式; Ge<sup>72</sup>、Bi<sup>209</sup> 为内标, 选取 Pb<sup>208</sup>、As<sup>75</sup> 进行 Pb、As 的测定。

### 1.3.3 标准溶液工作曲线绘制

分别将浓度为 1 000 µg/mL 的铅、砷标准溶液母液, 逐级稀释成质量浓度为 10 µg/mL 的混合标准溶液, 使用时将 10 µg/mL 的混合标准溶液配制成质量浓度为 0.000 5、0.001 0、0.002 0、0.003 0、0.004 0、0.005 0、0.010 0、0.020 0、0.050 0、0.100 0 µg/mL 的一系列混合标准溶液。

## 1.4 数据分析

应用 Microsoft Excel 2007 软件、SPSS Statistics 17.0 软件对实验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 前处理条件的选择

#### 2.1.1 消解体系的选择

二氧化硅、硅酸盐类食品添加剂、聚二甲基硅氧烷只溶于氢氟酸, 所以选用氢氟酸来消解样品, 硝酸用于氧化分解样品中的有机物, 而盐酸能溶解样品中

的无机化合物, 并可以与硅形成配合物加速反应的进行, 因此选用氢氟酸-盐酸-硝酸的混酸体系前处理消解样品, 由于普通的氢氟酸里砷含量特别高, 所以本研究选用电子级的氢氟酸。

#### 2.1.2 酸用量的选择

混酸体系中氢氟酸做为反应物与聚二甲基硅氧烷及硅酸盐的有效成分二氧化硅进行反应, 硝酸、硝酸不仅能够消化分解样品, 同时还能够加速反应的进行, 根据环保尽量减少试剂用量的要求及实际消解罐容量的要求, 酸的总量尽量控制在 15 mL 以内。由于二氧化硅在 4 种含硅类食品添加剂中硅成分最高, 且硅酸盐的有效成分为二氧化硅, 因此可以把二氧化硅消化所需氢氟酸量作为最大氢氟酸用量。

以称取 0.4 g 二氧化硅为例, 本研究通过进行 3 次加标回收实验, 考察了氢氟酸的使用量对测定结果的影响, 发现随着氢氟酸量的增加, 铅、砷的加标回收率逐渐增加, 当氢氟酸量为 4 mL 时, 回收率达到 98.3%, 再增加氢氟酸量, 回收率基本无变化, 说明加入 4 mL 氢氟酸已经能够把样品消化完全, 考虑实际称量过程中, 样品称取量可能会增加, 故选取 5 mL 氢氟酸、2 mL 硝酸、4 mL 盐酸作为前处理用酸量, 此时混酸的量能够把样品消化分解完全。

## 2.2 仪器分析干扰与校正

在 ICP/MS 分析过程中, 主要存在两种干扰: 质谱方面的干扰和非质谱方面的干扰。质谱干扰主要有多原子分子离子的重叠和同量异位素的重叠, 而同量异位素的重叠是最常见的干扰, 减少同量异位素的干扰一般选择丰度较高的同位素进行近似校正。由于 Pb 有 8 种同位素, 存在同量异位素的重叠干扰, 因此选用相对丰度最高为 52.4% 的 Pb<sup>208</sup> 作为分析元素, 而 As 只有一种同位素 As<sup>75</sup>, 所以实验中选用 Pb<sup>208</sup>、As<sup>75</sup> 作为测定目标。而等离子体产生的多原子离子与待测元素质量数重叠是质谱干扰的主要来源, As 元素虽然仅有 As<sup>75</sup> 一种同位素, 但容易受到 Ar<sup>38</sup>+Cl<sup>37</sup> 及 Ar<sup>40</sup>+Cl<sup>35</sup> 的双原子干扰<sup>[23,24]</sup>, Cl<sup>37</sup>+Cl<sup>35</sup> 也会对 Ge<sup>72</sup> 造成干扰, 本研究应用碰撞/反应池技术, 动能歧视模式<sup>[25-27]</sup>来消除多原子离子的干扰。而对于样品基体和信号漂移等引起的非质谱干扰, 常通过稀释溶液、加入内标的方法来消除, 内标物的选择应尽量能够与被测元素性质相似、质量数相近, 因此选择 Ge<sup>72</sup> 作为 As<sup>75</sup> 的内标, Bi<sup>209</sup> 做 Pb<sup>208</sup> 的内标, 所以 ICP/MS 测定铅、砷, 本研究选用 Bi<sup>209</sup>、Ge<sup>72</sup> 做内标, 选取 Pb<sup>208</sup>、As<sup>75</sup>, 采用氦气动能歧视模式进行 Pb、As 的分析检测。

## 2.3 方法学验证

### 2.3.1 线性及方法检出限

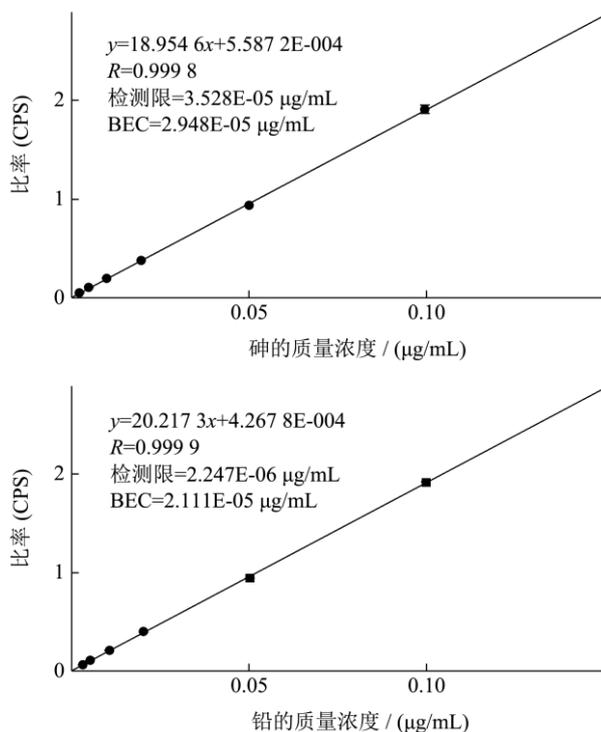


图1 标准溶液工作曲线

Fig.1 Standard solution curves

使用电感耦合等离子体质谱仪对铅、砷的混合标

准溶液进行测定, 铅以质量浓度为横坐标 $[x/(\mu\text{g/mL})]$ , 以信号值为纵坐标 $(y/\text{CPS})$ , 砷以质量浓度为横坐标 $[x/(\mu\text{g/mL})]$ , 以信号值为纵坐标 $(y/\text{CPS})$ 拟合工作曲线, 如图1所示铅的线性相关方程为:  $y=20.2173x+4.2678E-004$ ,  $R^2=0.9999$ , 砷的线性相关方程为:  $y=18.9546x+5.5872E-004$ ,  $R^2=0.9998$ , 铅、砷的相关系数 $R^2$ 均大于0.999, 说明在0.0005~0.1000  $\mu\text{g/mL}$ 的浓度范围内均呈现良好的线性关系。

测定11份与样品前处理方法完全相同的试剂空白溶液, 按照称样量0.4g, 定容至50mL计, 计算铅的方法检出限为0.003mg/kg, 低于GB 5009.75-2014《食品添加剂中铅的测定》第二法石墨炉原子吸收光谱法的检出限0.005mg/kg, 砷的方法检出限为0.002mg/kg, 而GB 5009.76-2014《食品添加剂中砷的测定》第二法氢化物原子荧光光度法中规定砷的检出限为0.01mg/kg, 说明此方法测定铅、砷检出限低。

### 2.3.2 加标回收实验

本研究选取了多个含硅类食品添加剂二氧化硅、硅酸钙、硅酸镁、聚二甲基硅氧烷进行不同水平的3次加标回收实验, 实验结果见表1、表2。结果显示铅的加标回收率为92.0%~107.0%, 砷的加标回收率为94.0%~104.0%, 加标回收率均满足GB/T 27404-2008中实验室质量控制规范对于加标回收的要求, 说明此方法准确性好。

表1 不同水平的铅的加标回收实验

Table 1 Experimental data on spiked recoveries of different levels of lead (n=3)

样品	铅/(mg/kg)	加标量/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	RSD/%	回收率/%
二氧化硅 1	3.82	1.00	4.79	2.01	97
		5.00	8.78	1.92	99.2
		10.00	13.6	2.18	97.8
二氧化硅 2	1.49	0.30	1.77	3.02	93.9
		1.00	2.52	2.14	103
		3.00	4.71	2.68	107
硅酸镁	2.33	0.30	2.61	2.77	93.3
		1.00	3.28	1.99	95
		3.00	5.37	2.09	101.3
硅酸钙	7.85	1.00	8.77	3.19	92
		5.00	12.7	2.87	97
		10.00	17.6	1.96	97.5
聚二甲基硅氧烷	0.065	0.10	0.17	2.58	106
		0.30	0.35	2.44	95.3
		1.00	1.05	1.67	98.5

注: 二氧化硅 1 和 2 代表不同的二氧化硅样品。

表 2 不同水平的砷的加标回收实验

**Table 2 Experimental data on spiked recoveries of different levels of arsenic (n=3)**

样品	砷/(mg/kg)	加标量/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	RSD/%	回收率/%
二氧化硅 1	0.021	0.10	0.12	3.02	99.0
		0.30	0.32	2.74	99.7
		1.00	1.03	2.06	100.9
二氧化硅 2	0.017	0.10	0.12	2.97	104.0
		0.30	0.33	3.15	103.0
		1.00	1.01	2.11	99.3
硅酸镁	0.15	0.10	0.25	1.99	100.2
		0.30	0.43	2.05	93.3
		1.00	1.13	3.00	98.0
硅酸钙	0.06	0.10	0.16	2.33	100.0
		0.30	0.35	1.68	96.7
		1.00	1.05	2.57	99.0
聚二甲基硅氧烷	0.034	0.10	0.13	2.66	96.0
		0.30	0.32	1.97	95.3
		1.00	1.04	1.64	100.6

表 3 质控样的精密度和准确度实验

**Table 3 Precision and accuracy experiment of quality control sample (n=6)**

样品	元素	标准值/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	RSDs/%	RE/%	加标量/(mg/kg)	测定值/(mg/kg)	回收率/%		
大葱	铅	1.34±0.16	1.28	1.26	1.26	2.49	-5.97	1.00	2.21	2.19	
			1.24	1.22					2.30	2.20	
			1.31	1.27					2.23	2.25	
			0.52	0.51					1.01	0.99	
大葱	砷	0.52±0.11	0.51	0.50	0.51	1.48	-1.92	0.500	1.09	1.00	104.0
			0.50	0.51					1.04	1.07	

表 4 标准规定方法与 ICP/MS 法的测定结果比对

**Table 4 Comparisons between standard method and ICP/MS method**

样品	聚二甲基硅氧烷		硅酸镁		二氧化硅		硅酸钙	
	ICP/MS	产品标准	ICP/MS	产品标准	ICP/MS	产品标准	ICP/MS	产品标准
铅/(mg/kg)	0.065	未检出(<0.005)	2.33	2.19	1.49	1.28	2.31	未检出(<2.5)
回收率/%	95.3~106.0	87.9~94.2	92.0~101.3	89.1~110.2	93.9~107.0	86.3~92.4	95.4~106.3	91.3~114.8
砷/(mg/kg)	0.034	未检出(<0.01)	0.15	0.14	0.017	未检出(<0.01)	无要求	无要求
回收率/%	94.0~100.6	88.0~114.0	94.7~104.0	90.0~108.5	99.3~104.0	89.4~109.1	无要求	无要求

2.3.3 准确度与精密度实验

选取国家标准物质中心的标准物质大葱作为质控样进行 Pb、As 的测定，测定结果如表 3 所示。结果显示，检测值在标准要求范围内，相对标准偏差 (Relative Standard Deviations, RSDs)、相对偏差 (Relative Deviation, RE) 都较小，结果表明混酸体系-电感耦合等离子体质谱法测定 Pb、As 的准确性好，精密度高，同时对硅酸镁样品进行了 6 次平行测定，铅、砷的 RSDs 分别为 4.03% 和 5.16%，进一步表明此方法精密度好。

2.3.4 与产品标准结果比对

聚二甲基硅氧烷及其乳液、硅酸镁中铅按照 GB 5009.75-2014 第二法微波消解-石墨炉原子吸收光谱法进行测定，砷按照 GB 5009.76-2014 第二法氢化物原子荧光光度法进行测定。二氧化硅按照 GB 25576-2010 规定，样品加盐酸加热后，过滤、洗涤、定容，然后用原子荧光分光光度法进行铅、砷的测定。硅酸钙按照 GB 1886.90-2015 规定的方法，用火焰原子吸收光度计进行单点比较。分别进行 6 次平行测定和 3 次加标回收实验，结果见表 4。从表 4 中可以看出产品标

准测定含硅类食品添加剂测定结果偏低,回收率较差。并且标准方法测定铅、砷操作烦琐、耗时长,因此电感耦合等离子体质谱法是一种很好的测定含硅类食品添加剂的方法。

### 3 结论

本研究对不同种类的含硅类食品添加剂进行了铅、砷检测方法的研究,建立了氢氟酸-盐酸-硝酸微波消解体系下的 ICP/MS 法的检测方法。该方法解决了国家标准中含硅类食品添加剂不能前处理完全,导致铅、砷测定结果不准确的难题。本实验中对不同的样品进行不同含量水平的加标回收实验,铅、砷的加标回收率分别为 92.0%~107.0%和 94.0%~104.0%,铅、砷的检出限分别为 0.003 和 0.002 mg/kg,远低于产品标准规定的重金属限量。所以本研究建立的方法测定铅、砷具有准确度高、灵敏度高、精密度好、检出限低、基体干扰小优点,检测数据更加准确,能够为企业有效进行原料的把关,防止终产品出现重金属铅、砷的超标、超限量。

### 参考文献

- [1] 杜翠鸣,邢燕侠,柴颂刚,等.二氧化硅与液体介质的亲和性表征[J].无机化学学报,2016,32(5):777-781.
- [2] Gilliland, Douglas, Barahona, et al. Multimethod approach for the detection and characterization of food-grade synthetic amorphous silica nanoparticles [J]. *Nanoscale Res Lett*, 2011, 6(1): 195.
- [3] 殷代武,谭卉文.滑石粉的应用特性及表面改性[J].广东化工,2013,40(18):75-77.
- [4] 李萍,刘文磊,杨双春,等.国内外滑石的应用研究进展[J].硅酸盐通报,2013,32(4):668-671.
- [5] 林舒亿,贾彦博,陈美春,等.空气/氩气双通气-原子吸收石墨炉法测定食用油中的二甲基硅氧烷[J].食品安全质量检测学报,2020,11(24):9226-9229.
- [6] 肖洁.益生菌对铅致学习记忆损伤的修复效应及其激励研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [7] Lucchini RG, Zoni S, Guazzetti S, et al. Inverse association of intellectual function with very low blood lead but not with manganese exposure in Italian adolescents [J]. *Environmental Research*, 2012, 118(10): 65-71.
- [8] Smith MR, Yevvo P, Sadahito M, et al. Integrative bioinformatics identifies postnatal lead (Pb) exposure disrupts developmental cortical plasticity [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-12.
- [9] Chen W W, Zhang X, Huang W J. Neural stem cells in lead toxicity [J]. *Eur Rev Med PharmacolSci*, 2016, 20(24): 5174-5177.
- [10] Alkas, Shahir S, Ibrahim N, et al. Arsenic removal technologies and future trends: A mini review [J]. *J Clean Prod*, 2021, 278: 123805.
- [11] 李航.原子荧光法测定食品中砷含量前处理的研究进展[J].农产品加工,2019,10:73-74,77.
- [12] 钟一平.原子荧光光谱法测定大米中的砷含量[J].粮食储藏,2017,46(5):27-29.
- [13] 肖亚兵,何健,马兴,等.固相萃取-电感耦合等离子体质谱法测定酱油中铅和镉[J].食品研究与开发,2018,39(6):146-150.
- [14] 董亚蕾,李梦怡,董喆,等.调味品及调味品配料中铅和砷含量的测定[J].中国调味品,2018,43(9):163-166.
- [15] 邵玉芳,邵世勤.微波消解-火焰原子吸收光谱法测定水产品中重金属元素[J].食品研究与开发,2018,39(14):159-162.
- [16] Alp O, Tosun G. A rapid on-line non-chromatographic hydride generation atomic fluorescence spectrometry technique for speciation of inorganic arsenic in drinking water [J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 10-15.
- [17] Grassin D S, Martin M, Hamzaoui O, et al. A high-resolution ICP/MS method for the determination of 38 inorganic elements in human whole blood, urine, hair and tissue after microwave digestion [J]. *Talanta*, 2019, 199: 228-337.
- [18] 罗欢忠,刘俊武.微波消解-电感耦合等离子体-质谱法测大米中的铅、镉、汞和砷[J].光谱实验室,2012,29(1):470-474.
- [19] 肖亦群,姚仰勋,黄燕萍.ICP/MS 测定 50 种市售大米中铅、砷、镉、铬、汞的方法研究以及风险评估[J].现代食品,2020, 14:187-190.
- [20] 秦素妮,黄俊杰,全洗强,等.微波消解-ICP-OES/ICP/MS 法测定桂花中 46 种元素[J].食品与机械,2017,33(4):66-69,89.
- [21] 彭敏.ICP/MS 法测定食品添加剂氢氧化钠中五种重金属[J].东莞理工学院学报,2015,22(3):67-70.
- [22] 于文江,郑红,赵发,等.ICP/MS 技术同时测定多种食品添加剂中十一种元素[J].中国食品添加剂,2019,5:109-115.
- [23] Balcaen L, Bolea-Fernandez E, Resano M, et al. Inductively coupled plasma-Tandem mass spectrometry (ICP/MS/MS): a powerful and universal tool for the interference-free determination of (ultra) trace elements a tutorial review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 894: 7-19.
- [24] 赵小学,张霖琳,张建平,等.ICP/MS 在环境分析中的质谱干扰及消除[J].中国环境监测,2014,30(3):101-106.
- [25] 董瑞,刘艳明,赵发,等.电感耦合等离子体质谱法同时测定茶叶中的铅、砷、铬、镉[J].食品安全导刊,2019,27:80-81.
- [26] 张蕾,郭启新,李长寿,等.碰撞池-电感耦合等离子质谱法同时测定水果中 26 种微量元素的含量[J].食品安全质量检测学报,2018,9(14):3765-3769.
- [27] 黄艳,陈伟萍,陈林军,等.微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定婴幼儿米粉中 5 中痕量元素[J].中国卫生检验杂志,2020,30(11):1296-1299.