

# 正交设计优化石墨炉原子吸收光谱法测定 食用盐中的微量铅

罗建民, 彭翠红\*, 张瑞莹, 陈观美

(韶关学院化学与土木工程学院, 韶关 512005)

**摘要:** **目的** 建立并优化测定食用盐中微量铅(Pb)的石墨炉原子吸收光谱法(graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS)。**方法** 利用磷酸二氢铵-酒石酸作为基体改进剂, 通过正交试验优化 GFAAS 测定食盐中 Pb 的条件, 包括灰化温度、原子化温度、基体改进剂种类。**结果** GFAAS 最佳测定条件为: 灰化温度 200 °C, 原子化温度 2000 °C, 10 µg/L 磷酸二氢铵-10 µg/L 酒石酸混合溶液作为基体改进剂。在该条件下, Pb 在 0.0~50.0 µg/L 范围内线性关系良好, 相关系数  $r=0.9979$ , 方法检出限为 0.10 µg/L, 测定下限为 0.5 mg/kg。将方法应用于市售湖盐、海盐、井矿盐等 7 种样品中 Pb 含量的测定, 相对标准偏差为 3.9%~8.0%, 加标回收率为 93.7%~108.8%。**结论** 本研究所建立的方法适用于食盐中微量 Pb 含量的快速准确定量检测。**关键词:** 食用盐; 石墨炉原子吸收光谱法; 铅; 正交试验

## Determination of trace lead in edible salt by graphite furnace atomic absorption spectrometry optimized by orthogonal test

LUO Jian-Min, PENG Cui-Hong\*, ZHANG Rui-Ying, CHEN Guan-Mei

(School of Chemistry and Civil Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005, Guangdong)

**ABSTRACT: Objective** To establish and optimize a method for the determination of trace lead (Pb) in edible salt by graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS). **Methods** Ammonium dihydrogen phosphate-tartaric acid was used as matrix modifier, the experimental conditions of determination of Pb in edible salt by GFAAS including ashing temperature, atomic temperature and types of ascorbic acid were optimized by orthogonal test. **Results** The optimal determination conditions of GFAAS were as follows: Ashing temperature 200 °C, atomization temperature 2000 °C, 10 g/L ammonium dihydrogen phosphate-10 g/L tartaric acid were used as matrix modifier. Under this conditions, Pb had good linearity in the range of 0.0–50.0 µg/L, with the correlation coefficient  $r=0.9979$ , the detection limit of 0.10 µg/L, and the minimum quantitative detection limit was 0.5 mg/kg. The proposed method was applied to the determination of lead content in 7 kinds of edible salt samples, the relative standard deviations were 3.9%–8.0%, the recoveries of samples were 93.7%–108.8%. **Conclusion** The method

**基金项目:** 韶关市科技计划项目(2019sn055)、广东省自然科学基金项目(2021A1515010060)、广东省科技创新战略专项项目(“大专项+任务清单”)(韶科〔2020〕44号)、广东省普通高校科研项目(2019KTSCX162)

**Fund:** Supported by the Shaoguan Science and Technology Plan Project (2019sn055), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515010060), the Specialized Scientific Research Fund Projects of Guangdong Province (“Major Special Projects+Task List”) (NO.〔2020〕44), and the Innovation Projects of Department of Education of Guangdong Province (2019KTSCX162)

**\*通信作者:** 彭翠红, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为分析化学。E-mail: 453769413@qq.com

**\*Corresponding author:** PENG Cui-Hong, Master, Senior Engineer, Shaoguan University, No.288, Daxue Road, Zhenjiang District, Shaoguan 512005, China. E-mail: 453769413@qq.com

established in this study is suitable for rapid and accurate determination of trace Pb content in table salt.

**KEY WORDS:** edible salt; graphite furnace atomic fluorescence spectrometry; lead; orthogonal test

## 0 引言

食用盐作为生活中不可或缺的、维持人体正常新陈代谢的重要物质之一,对调节人体机能、维护人体健康起着极其重要的作用<sup>[1-3]</sup>。我国现市面上出售的食用盐主要为海盐、井矿盐、湖盐等,原料来源广泛,生产过程如加工、包装、储运等各个环节无可避免会受到有害物质的污染<sup>[4-5]</sup>。食用盐中除含有 NaCl,还含有微量的重金属,比如  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Hg}^{+}$ 等,其中铅(Pb)是一种有害的蓄积性重金属,可通过血液侵入大脑神经组织,造成供氧不足,脑组织损伤,严重者可能导致终身残废<sup>[5]</sup>。因此,微量 Pb 测定是食用盐的安全监管中必不可少的项目之一。在 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量(含第 1 号修改单)》中,Pb 的限量指标排在第一位,涉及 22 大类食品中 Pb 含量限值,其中食用盐的限量为 2.0 mg/kg。国家标准规定的检测方法为 GB 5009.12—2017《食品安全国家标准 食品中 Pb 的测定》,目前,食用盐中微量 Pb 的测定方法有原子荧光光谱法<sup>[6]</sup>、二硫腈比色法<sup>[4]</sup>、电化学方法<sup>[7]</sup>、原子吸收光谱法<sup>[8-10]</sup>、电感耦合等离子体质谱法<sup>[11]</sup>等。二硫腈比色法以及电化学方法前处理烦琐,电感耦合等离子体质谱法价格昂贵,原子荧光法主要适合于 Hg、As 的测定,原子吸收光度法操作简单快捷,方法具有较高的灵敏度和准确性,是目前使用最多的 Pb 检测方法,可分为火焰原子吸收光度法和石墨炉原子吸收光度法,相比火焰原子吸收光度法,石墨炉原子吸收光度法原子化效率更高,检出限更低,所需样品量更少,仪器的稳定性更高<sup>[12-14]</sup>。

石墨炉原子吸收光度法测定食用盐中 Pb 含量时,食用盐中主要成分 NaCl 会产生较大的背景干扰,而基体改进技术能降低甚至消除 NaCl 背景干扰,基体改进技术是通过加入基体改进剂,使样品在原子化过程中,增加待测样品溶液基体的挥发性,使之在原子化阶段先于待测元素被去除;或提高待测元素的稳定性,避免待测元素在原子化前挥发而损失<sup>[15-16]</sup>。石墨炉原子吸收光度法测定 Pb 常采用的基体改进剂有磷酸二氢铵、氯化钡、酒石酸、抗坏血酸、钨-钡-酒石酸等,这些基体改进剂能降低原子化温度,Pb 在大量样品基体挥发之前完成原子化,使原子吸收信号与背景信号互相分离,从而减少甚至消除基体化学干扰和背景吸收的影响<sup>[17-18]</sup>。其中,磷酸二氢铵在灰化阶段会受热分解产生  $\text{H}_2$  与  $\text{Cl}^-$ ,形成 HCl 而挥发,同时形成还原性氛围,避免 Pb 与  $\text{Cl}^-$ 形成氯化物,减少目标物质损失,是一种消除  $\text{Cl}^-$ 干扰效果很好的基体改进剂<sup>[19-20]</sup>。酒石酸具有羧基和羟基,可以与 Pb 形成络合物,减少形成共挥发体,

在原子化时候不受基体影响;其分解产物可形成还原性气体,从而降低原子化温度;同时,酒石酸还是表面活性剂,可降低液滴表面及溶盐表面张力,避免干燥和灰化阶段的“喷跳”现象<sup>[21]</sup>。因此,本研究拟采用磷酸二氢铵和酒石酸混合基体改进剂,从掩蔽  $\text{Cl}^-$ 和降低原子化温度两方面改善分析的准确度和精密度,通过正交试验法<sup>[22]</sup>优化石墨炉原子吸收光度法测定 Pb 的最佳条件,并将方法用于测定市售湖盐、海盐、井矿盐等 7 种食用盐样品中 Pb 含量,为研究食用盐中 Pb 测定提供新的参考方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与材料

Pb 标准储备液[1000  $\mu\text{g/mL}$ , GSBG62071-90(8201)](国家钢铁材料测试中心钢铁研究总院),临用前用 2%  $\text{HNO}_3$  稀释成标准使用液。

$\text{HNO}_3$ 、酒石酸、磷酸二氢铵(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);试验用水均为电阻率 $>18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$  的去离子水。

### 1.2 仪器与设备

WFX-120A 原子吸收分光光度计[带 WF-1E 石墨炉,北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司];IC012 自动冷却水循环装置(深圳勒普拓仪器技术有限公司);Pb 空心阴极灯(北京有色金属研究总院);MS104TS 电子天平[万分之一,瑞士梅特勒托利多(上海)有限公司]。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理

准确称取 0.05 g 样品于 100 mL 烧杯中,用 2%硝酸溶解完全后,定容至 250 mL 容量瓶,摇匀。

#### 1.3.2 基体改进剂优化

基体改进剂的配制:称取 0.1 g 磷酸二氢铵固体于 10 mL 烧杯中用蒸馏水溶解,移入 10 mL 比色管中,用水稀释定容至刻度,即得 10 g/L 磷酸二氢铵;称取 0.1 g 酒石酸固体于 10 mL 烧杯中用蒸馏水溶解,移入 10 mL 比色管中,用水稀释定容至刻度,即得 10 g/L 酒石酸。

基体改进剂添加量的确定:10 g/L 磷酸二氢铵和 10 g/L 酒石酸用量各 5  $\mu\text{L}$  的条件下,改变基体改进剂添加体积(1、3、5、7、9  $\mu\text{L}$ ),进样量 20  $\mu\text{L}$  (Pb 标准溶液浓度为 50.0  $\mu\text{g/L}$ ),在石墨炉升温程序以及进样量不变时,比较各组吸光度。

测定条件设置:灯电流:3 mA,狭缝宽度:0.2 nm,进样量 20  $\mu\text{L}$  (Pb 标准溶液浓度为 50.0  $\mu\text{g/L}$ ),10 g/L 磷酸二氢

铵-10 g/L 酒石酸基体改进剂量 10 μL (各 5μL), 石墨炉升温程序见表 1。

| 表 1 石墨炉升温程序<br>Table 1 Graphite furnace heating programs |      |      |        |
|----------------------------------------------------------|------|------|--------|
| 步骤                                                       | 温度/℃ | 斜坡/S | 保持时间/s |
| 干燥                                                       | 100  | 5    | 20     |
| 灰化                                                       | 200  | 0    | 15     |
| 原子化                                                      | 2000 | 0    | 3      |
| 冲洗                                                       | 2300 | 0    | 2      |

1.3.3 正交试验设计

为考察基体改进剂种类对 GFAAS 测定结果的影响, 选择 10 g/L 磷酸二氢铵-10 g/L 抗坏血酸各 5 μL 作为对比,

采用  $L_8(2^7)$ 正交设计表进行试验, 考察灰化温度(A)、原子化温度(B)、混合基体改进剂(C) 3 个对因素对吸光度(Y)值的影响, 因素水平表见表 2, 每组试验平行测定吸光度 3 次, 取平均值。

2 结果与分析

2.1 基体改进剂添加量的确定

由表 3 可知, 10 g/L 磷酸二氢铵和 10 g/L 酒石酸各 5 μL 时, Pb 测定吸光度值最大。这主要是由于基体改进剂体积太低时, 无法完全消除基体的干扰, 当体积太大时, 会降低原子化温度, 使 Pb 原子化效率降低。因此, 测定样品中 Pb 时, 选取加入基体改进体 10 g/L 磷酸二氢铵和 10 g/L 酒石酸各 5 μL。

| 表 2 因素水平表<br>Table 2 Factor level table |          |           |                                    |
|-----------------------------------------|----------|-----------|------------------------------------|
| 水平                                      | A 灰化温度/℃ | B 原子化温度/℃ | C 混合基体改进剂                          |
| 1                                       | 200      | 2300      | 5 μL 10 g/L 磷酸二氢铵-5 μL 10 g/L 酒石酸  |
| 2                                       | 400      | 2000      | 5 μL 10 g/L 磷酸二氢铵-5 μL 10 g/L 抗坏血酸 |

| 表 3 基体改进剂用量对吸光度的影响(n=3)<br>Table 3 Effects of matrix modifiers dosages on the absorbance of lead (n=3) |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 磷酸二氢铵/μL                                                                                               | 酒石酸/μL |        |        |        |        |
|                                                                                                        | 1.00   | 3.00   | 5.00   | 7.00   | 9.00   |
| 1.00                                                                                                   | 0.1933 | 0.3214 | 0.5043 | 0.4163 | 0.2893 |
| 3.00                                                                                                   | 0.2071 | 0.3395 | 0.5102 | 0.4371 | 0.3195 |
| 5.00                                                                                                   | 0.2094 | 0.3638 | 0.5345 | 0.4628 | 0.3244 |
| 7.00                                                                                                   | 0.1904 | 0.3198 | 0.5206 | 0.4245 | 0.3208 |
| 9.00                                                                                                   | 0.1791 | 0.3067 | 0.5093 | 0.3956 | 0.2719 |

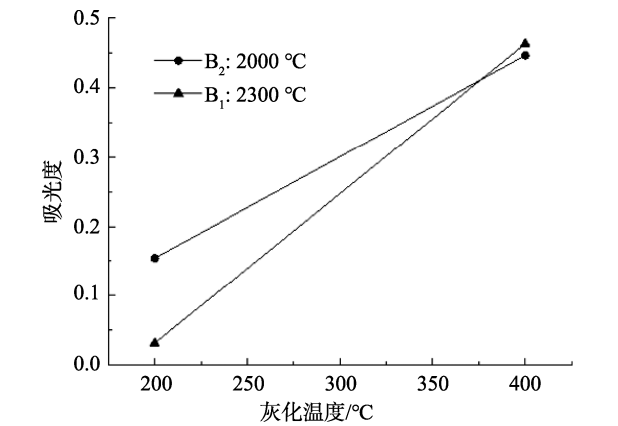


图 1 灰化温度和原子化温度的交互作用  
Fig.1 Interaction of ashing temperature and atomization temperature

2.2 正交试验结果

2.2.1 交互作用的影响

根据表 4 因素水平表设定的条件, 考察灰化温度(A)和原子化温度(B) 2 因素对吸光度有影响是否具有交互作用。通过改变灰化温度和原子化温度测定吸光度, 结果见图 1。结果可见, 当原子化温度为 2000 °C和 2300 °C时, 吸光度均随着灰化温度的升高而增加, 但是原子化温度为 2300 °C时, 吸光度值升高速度明显高于 2000 °C时, 表明灰化温度和原子化温度对吸光度值的影响有交互作用, 因此采用正交试验优化试验条件时, 需考虑灰化温度和原子化温度之间的交互作用。

2.2.2 正交试验结果

$L_8(2^7)$ 正交试验结果分析见表 4。根据  $K_1$ 、 $K_2$  得出极差 R, 由极差 R 大小可确定各因素对 Pb 吸光度影响的主次顺序为:  $A>A\times B>B>C$ , 由于交互作用  $A\times B$  比因素 B 对试验结果影响更大, 故按因素 A、B 各水平搭配好坏来确定因素 B 的优水平, 两因素搭配见表 5,  $A_1B_2$  对应的吸光度最大。因此, 选  $A_1B_2$ , 优方案为  $A_1B_2C_2$ , 由于 C 因素为次要因素, 因此, 亦可选  $A_1B_2C_1$ 。优化条件验证: 按方案  $A_1B_2C_2$  重复试验 5 次, 结果见表 7, 5 次结果平均值为 0.5956, 结果略小于上述正交试验吸光度值最大值 0.6257, 相对标准偏差为 3.9%。

表 4  $L_8(2^7)$ 正交试验结果分析( $n=3$ )  
Table 4 Results analysis of  $L_8(2^7)$  orthogonal test ( $n=3$ )

| 试验号   | A      | B      | A×B    | C      | 空白项    |        | 吸光度    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 0.5304 |
| 2     | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      | 0.5709 |
| 3     | 1      | 2      | 2      | 1      | 1      | 2      | 0.6096 |
| 4     | 1      | 2      | 2      | 2      | 2      | 1      | 0.6257 |
| 5     | 2      | 1      | 2      | 1      | 2      | 1      | 0.5219 |
| 6     | 2      | 1      | 2      | 2      | 1      | 2      | 0.5032 |
| 7     | 2      | 2      | 1      | 1      | 2      | 1      | 0.3484 |
| 8     | 2      | 2      | 1      | 2      | 1      | 2      | 0.3494 |
| $K_1$ | 2.3366 | 2.1264 | 1.7991 | 2.0103 | 1.9926 | 2.0274 | 2.0077 |
| $K_2$ | 1.7229 | 1.9331 | 2.2604 | 2.0492 | 2.0669 | 2.0321 | 2.0518 |
| 极差 R  | 0.6137 | 0.1933 | 0.4613 | 0.0389 | 0.0743 | 0.0047 | 0.0441 |

表 5 因素 A 和 B 水平搭配表  
Table 5 Level collocation table for factor A and B

| 因素    | $A_1$                | $A_2$                |
|-------|----------------------|----------------------|
| $B_1$ | $(Y_1+Y_2)/2=0.5507$ | $(Y_5+Y_6)/2=0.5126$ |
| $B_2$ | $(Y_3+Y_4)/2=0.6177$ | $(Y_7+Y_8)/2=0.3489$ |

经过试验得出最优方案为  $A_1B_2C_2$ ，由于抗坏血酸-磷酸二氢铵混合基体改进剂与酒石酸-磷酸二氢铵混合基体改进剂之间吸光度相差不大，说明因素 C 对测定结果影响相对较小，但抗坏血酸溶液配制后不稳定，易被氧化，使用前要重新配制，而酒石酸性质更加稳定，保存时间久，因此实际应用中酒石酸更为方便。综上，GFAAS 测定食盐中铅的最优化条件：10 g/L 磷酸二氢铵和 10 g/L 酒石酸各 5  $\mu$ L 作为混合基体改进剂，灰化温度为 200  $^{\circ}$ C，原子化温度为 2000  $^{\circ}$ C。

2.3 标准曲线及检出限

临用前用 2%  $HNO_3$  稀释的 0.1  $\mu$ g/mL 的 Pb 标准工作液配制成 0.0、10.0、20.0、30.0、40.0、50.0  $\mu$ g/L Pb 标准系列溶液，测定其吸光度。以吸光度值为纵坐标(Y)，Pb 的质量浓度为横坐标(c,  $\mu$ g/L)，得线性方程  $Y=0.0116c+0.0111$ ，相关系数  $r=0.9979$ ，线性范围为 0~50.0  $\mu$ g/L。连续

测定 11 次空白溶液，根据方法检出限(method detection limit, MDL)= $t_{(n-1,0.99)} \cdot s^{[21]}$ ，其中 s 为平行测定的标准偏差，n 为重复分析的样品数， $t_{(n-1,0.99)}$ 为置信度为 99%、自由度为 n-1 时的 t 值，计算得方法检出限为 0.10  $\mu$ g/L，测定下限为 0.5 mg/kg，远小于食用盐中 Pb 限量 2.0 mg/kg，满足日常食盐中微量铅的检测和监测。

2.4 加标回收试验

称取 3 份 0.0500 g 7 号食用盐样品，用 2%  $HNO_3$  溶解于 100 mL 烧杯中，溶解完全后，分别加入 5.00、10.00 和 20.00 mL 0.1  $\mu$ g/mL Pb 标准工作液，摇匀，稀释定容至刻度。每 1 份平行测定 5 次。加标回收率在 101.6%~106.5% 之间，相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs)在 0.79%~2.30% 之间，由此可见，该方法准确度和精密度均较高。

2.5 样品分析

在优化所得 GFAAS 条件下测定样品液的吸光度，同时做加标回收实验，称取样品 0.0500 g，加入 Pb 标准使用液(0.1  $\mu$ g/mL) 0.5 mL，然后按照 1.3 试验步骤进行，结果见表 6。样品加标回收率为 93.7%~108.8%，RSDs 为 3.9%~8.0%，说明该方法适用性良好。

表 6 7 种食盐样中 Pb 测定结果、加标回收率和 RSDs ( $n=3$ )  
Table 6 Determination results, recoveries and RSDs of lead in 7 kinds of salt samples ( $n=3$ )

| 样品号   | 平均值/(mg/kg) | RSD/% | 加标量/(mg/kg) | 测得值/(mg/kg) | 加标回收率/% |
|-------|-------------|-------|-------------|-------------|---------|
| 湖盐 1  | 1.44        | 4.9   | 1.0         | 2.41        | 96.8    |
| 海盐 2  | 1.90        | 8.0   | 1.0         | 2.92        | 101.6   |
| 海盐 3  | 1.85        | 4.6   | 1.0         | 2.91        | 105.7   |
| 海盐 4  | 1.96        | 3.9   | 1.0         | 2.90        | 93.7    |
| 海盐 5  | 1.94        | 7.0   | 1.0         | 2.92        | 97.9    |
| 井矿盐 6 | 1.27        | 4.0   | 1.0         | 2.35        | 107.9   |
| 井矿盐 7 | 1.29        | 5.7   | 1.0         | 2.38        | 108.8   |

注：1 号为湖盐系列；2 号~5 号为海盐系列；6 号~7 号为井矿盐系列。

由表 7 可知, 各类食用盐样品中 Pb 含量存在差异, 从高到低顺序: 海盐>湖盐>井矿盐, 海盐 Pb 含量普遍比湖盐和井矿盐高。主要原因是: 首先, 3 者所处的环境不同, 海盐、湖盐裸露于地表, 井矿盐资源分为埋藏在地下的固体石盐和液体卤水, 受重金属污染的程度较低; 其次, 3 者的加工工艺不同, 海盐一般采用日晒为主, 产量大且加工过程相对粗糙; 湖盐一般采用采掘法或滩晒法, 相比海盐加工程序更严格; 井矿盐生产主要分为采卤和制盐 2 个环节, 不同的矿型采用不同的采卤方法; 最后, 近十几年来, 由于沿海地区工业化和城市化的飞速发展, 大量重金属被排入到沿海环境里, 导致海盐中 Pb 含量增加<sup>[23]</sup>。

### 3 结 论

本研究通过正交试验法获得 GFAAS 测定微量 Pb 的最佳试验条件, 建立了 GFAAS 测定食用盐微量 Pb 的方法, 通过试验发现采用灰化温度 200 °C, 原子化温度 2000 °C, 10 g/L 磷酸二氢铵-10 g/L 酒石酸混合基体改进剂消除食用盐中 NaCl 对 Pb 测定的背景干扰, 相较于国家标准方法以及同类型的方法<sup>[9-10]</sup>, 本研究所建立方法更准确、更灵敏、更快速。将该方法应用于测定市面上常见的湖盐、海盐、井矿盐等 7 种食用盐样品中 Pb 含量, 测定结果相对标准偏差为 3.9%~8.0%, 样品加标回收率为 93.7%~108.8%, 测定结果良好, 该研究为快速准确测定食盐中 Pb 含量提供新的参考方法。

### 参考文献

- [1] 高喜凤, 董瑞, 刘艳明, 等. 食用盐中硅的测定[J]. 中国调味品, 2019, 44(7): 138-140, 150.  
GAO XF, DONG R, LIU YM, *et al.* Determination of silicon in edible salt [J]. China Cond, 2019, 44(7): 138-140, 150.
- [2] FANG PP, GUO TY, YONG W, *et al.* Rapid determination of volatile organic acids in edible salt and high-salinity food by direct analysis in real time mass spectrometry [J]. Int J Mass Spectrom, 2019, 444: 116166-116170.
- [3] XIE WQ, YU KX, GONG YX. Determination of iodate in iodized edible salt based on a headspace gas chromatographic technique [J]. J Chromatogr A, 2019, 1584: 187-191.
- [4] 朱影, 黄茜, 黄宗骞, 等. 我国现行食用盐相关标准中 Pb 含量测定方法浅析[J]. 中国调味品, 2020, 45(6): 191-193.  
ZHU Y, HUANG Q, HUANG ZQ, *et al.* Brief analysis of the determination methods for lead content in the current edible salt-related standards in China [J]. China Cond, 2020, 45(6): 191-193.
- [5] KIM SK, SONG NS. Microplastics in edible salt: A literature review focusing on uncertainty related with measured minimum cutoff sizes [J]. Curr Opin Food Sci, 2021, 41: 16-25.
- [6] 张寒霜, 韩晓晓, 赵发, 等. 氢化物原子荧光光谱法测定食用盐中 Pb[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(4): 91-95.  
ZHANG HS, HAN XX, ZHAO F, *et al.* Determination of lead in salt by hydride atomic fluorescence spectrometry [J]. China Food Addit, 2021, 32(4): 91-95.
- [7] 王雪梅, 吴守国, 周磊, 等. 同位素镉/过氧化聚乙酰胺/玻碳电极溶出伏安法测定食用盐中痕量镉和 Pb(英文)[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(8): 661-670.  
WANG XM, WU SG, ZHOU L, *et al.* Stripping analysis of trace cadmium and lead in edible salts by using the over-oxidized poly-(N-acetylaniline) modified electrode with in-situ deposited bismuth film [J]. J Univ Sci Technol China, 2013, 43(8): 661-670.
- [8] 乌尼尔, 其其格, 高娃, 等. 食盐中痕量 Pb 含量测定的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(3): 895-898.  
WU NE, QI QG, GAO W, *et al.* Study on detection of trace content of lead in salt [J]. J Food Saf Qual, 2013, 4(3): 895-898.
- [9] 仲婧宇, 孙浩然, 王静爽, 等. 石墨炉原子吸收光谱法测定高盐食品中的微量 Pb[J]. 化学分析计量, 2019, 28(2): 72-75.  
ZHONG JY, SUN HR, WANG JS, *et al.* Determination of trace lead in high-salt food by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Chem Anal Meter, 2019, 28(2): 72-75.
- [10] 宋小丽. 石墨炉原子吸收法测定高盐食品中 Pb 的含量[J]. 现代食品, 2021, (8): 211-213.  
SONG XL. Determination of lead content in high-salt food by graphite furnace atomic absorption method [J]. Mod Food, 2021, (8): 211-213.
- [11] 周宇, 贾宏新, 张元. 电感耦合等离子体质谱法测定大米中痕量砷、Pb、镉、铬、镍[J]. 分析试验室, 2016, 35(9): 1016-1018.  
ZHOU Y, JIA HX, ZHANG Y. Determination of trace arsenic, lead, cadmium, chromium and nickel in rice by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Anal Lab, 2016, 35(9): 1016-1018.
- [12] 杨登想, 刘艺, 张丛兰. 石墨炉原子吸收光谱法测定螃蟹及饲料中 Pb 离子的含量[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 296-299.  
YANG DX, LIU Y, ZHANG CL. Determination of lead ions in crabs and feed by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Food Ind, 2019, 40(10): 296-299.
- [13] 王文光, 李劼, 刘伟, 等. 非完全消化-GFAAS 测定葵花籽中的 Pb[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 318-320.  
WANG WG, LI J, LIU W, *et al.* Determination of lead in sunflower seeds by incomplete digestion-GFAAS [J]. Food Ind, 2020, 41(1): 318-320.
- [14] 陶颜娟, 周昆. 基体改进石墨炉原子吸收法测定干浒苔中的 Pb[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 279-281.  
TAO YJ, ZHOU K. Determination of lead in dry enteromorpha by matrix-modified graphite furnace atomic absorption method [J]. Food Ind, 2015, 36(5): 279-281.
- [15] 张烨, 高冬, 张连中. 基体改进技术在食品痕量元素分析中的应用[J]. 品牌与标准化, 2014, (18): 68-70.  
ZHANG Y, GAO D, ZHANG LZ. The application of matrix improvement technology in the analysis of food trace elements [J]. Brand Stand, 2014, (18): 68-70.
- [16] 李秀婷, 王冬. 石墨炉原子吸收法测定高盐食品中的微量 Pb[J]. 粮油食品科技, 2003, (4): 35-36.  
LI XT, WANG D. Determination of trace lead in high-salt food by graphite furnace atomic absorption method [J]. Sci Technol Cere Oils Food, 2003, (4): 35-36.
- [17] 陈梦静, 李艳, 吕晓峰, 等. 石墨炉原子吸收测定 Pb 含量中基体改进剂研究综述[J]. 现代农业科技, 2016, (18): 265-267.

- CHEN MJ, LI Y, LV XF, *et al.* Research review of matrix modifiers in graphite furnace atomic absorption determination of lead content [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2016, (18): 265–267.
- [18] 刘献新, 李清昌. 石墨炉原子吸收分析中的基体改进技术及应用[J]. *分析实验室*, 2008, 27(1): 477–480.
- LIU XX, LI QC. Matrix improvement technology and application in graphite furnace atomic absorption analysis [J]. *Anal Lab*, 2008, 27(1): 477–480.
- [19] 党贵玲, 张文世, 董惠, 等. 基体改进剂对原子吸收石墨法测定透析用水中铬元素含量的影响[J]. *山东化工*, 2020, 49(5): 115–116.
- DANG GL, ZHANG WS, DONG H, *et al.* The effect of matrix modifiers on the determination of chromium in dialysis water by atomic absorption graphite method [J]. *Shandong Chem Technol*, 2020, 49(5): 115–116.
- [20] 赵彦龙, 梁永津, 刘胜玉, 等. 石墨炉原子吸收法测定高盐样品中 Pb 基体改进剂的研究[J]. *广州环境科学*, 2013, 28 (1): 41–42.
- ZHAO YL, LIANG YJ, LIU SY, *et al.* Determination of lead matrix improver in high salt samples by graphite furnace atomic absorption method [J]. *Guangzhou Environ Sci*, 2013, 28(1): 41–42.
- [21] 彭荣飞, 黄聪, 黎淑端, 等. 有机基体改进剂用于 GFAAS 测定食盐中 Pb 的研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2005, 15(4): 402–404.
- PENG RF, HUANG C, LI SD, *et al.* Study on the application of organic matrix modifiers to the determination of lead in salt by GFAAS [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2005, 15(4): 402–404.
- [22] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *试验技术与管理*, 2010, 27(9): 52–55.
- LIU RJ, ZHANG YW, WEN CW, *et al.* Orthogonal experimental design and analysis method research [J]. *Exp Technol Manage*, 2010, 27(9): 52–55.
- [23] 杨文超, 黄道建, 陈继鑫, 等. 大亚湾海域 2009—2018 年重金属时空分布及污染评价[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(5): 65–75.
- YANG WC, HUANG DJ, CHEN JX, *et al.* Pollution assessment and temporal-Spatial distribution of heavy metals in seawater of daya bay during 2009—2018 [J]. *J South China Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 52(5): 65–75.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介



罗建民, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为光催化、分析化学。  
E-mail: 360138820@qq.com



彭翠红, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为分析化学。  
E-mail: 453769413@qq.com