

# 微波等离子体-原子发射光谱法测定 食用植物油中的多种微量金属元素

刘宏伟<sup>1</sup>, 黄建华<sup>2</sup>

(1. 湖南工学院材料与化学工程学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 湖南省中医药研究院 中药研究所, 长沙 410013)

**摘要:** 研究简单快速测定食用植物油中多种微量金属元素的方法。食用植物油样品经微波酸消解处理后采用微波等离子体-原子发射光谱法(MP-AES)测定消解液中微量金属元素 Mg、Al、K、Na、Ca、Fe、Cu、Zn、Sr、Mn 的含量。通过选择各元素的分析波长避免了大量光谱干扰, 利用快速线性干扰校正(FLIC)技术校正了潜在光谱干扰和背景干扰, 选择 Y、La、Lu 为内标元素校正基体效应, 采用加标回收实验并利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的对比分析结果评价了方法的准确性。结果表明, 各元素的检出限在 0.12~4.29  $\mu\text{g/L}$  之间, 加标回收率在 95.4%~104.0% 之间, 相对标准偏差(RSD)小于等于 4.1%, MP-AES 和 ICP-MS 的分析结果无显著性差异。建立的分析方法具有分析成本低、检出限低、准确性好等特点, 可用于食用植物油中多种微量金属元素含量的测定。

**关键词:** 食用植物油; 微波等离子体-原子发射光谱; 微量金属元素; 光谱干扰; 背景干扰; 基体效应  
**中图分类号:** TS227; O657.63      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-7969(2021)05-0125-05

## Determination of multi-trace metal element in edible vegetable oil by microwave plasma-atomic emission spectroscopy

LIU Hongwei<sup>1</sup>, HUANG Jianhua<sup>2</sup>

(1. Department of Material and Chemical Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, Hunan, China; 2. Institute of Chinese Materia Medica, Hunan Academy of Traditional Chinese Medicine, Changsha 410013, China)

**Abstract:** A rapid and simple analysis method was investigated for determining the content of multi-trace metal element in edible vegetable oil. The contents of trace metal elements such as Mg, Al, K, Na, Ca, Fe, Cu, Zn, Sr and Mn in edible vegetable oil samples were determined using microwave plasma-atomic emission spectroscopy (MP-AES) after microwave assisted acid digestion. A large number of spectral interferences were avoided by selecting the analysis wavelength. The potential spectral interference and background interference were corrected by using fast linear interference correction (FLIC) technology. Y, La and Lu were selected as internal standard elements to correct the matrix effect. The accuracy of the method was evaluated by the spike recovery experiment and the comparative analysis with the results of inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The results

showed that the limit of detection of analyte was 0.12-4.29  $\mu\text{g/L}$ , the spiked recovery rate was 95.4%-104.0%, and the relative standard deviation (RSD) was less than or equal to 4.1%. There was no significant difference between the analysis results of MP-AES and ICP-MS. The developed method had the characteristics of low cost, low limit of detection and good accuracy, and it could be applied to the determination of

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(81603400); 长沙市杰出创新青年培养计划(kq1802017); 长沙市科技计划项目(kq1901067); 湖南省中医药研究院科研项目(201805); 湖南省应用特色学科材料科学与工程学科(湘教通[2018]469号); 湖南省工程研究中心(湘发改委高技[2019]853号)

作者简介: 刘宏伟(1969), 男, 教授, 硕士, 主要从事质谱分析方法的研究(E-mail) hwl0466@163.com。

multi-trace metal element in edible vegetable oil.

**Key words:** edible vegetable oil; microwave plasma-atomic emission spectroscopy; trace metal element; spectral interference; background interference; matrix effect

食用植物油中所含无机元素对于食用植物油的新鲜度、储存性和安全性起重要作用,有些微量元素(如 Cu 和 Fe)能与脂类直接反应生成脂类烷基自由基,产生活性氧,同时还通过分解氢过氧化物加速食用植物油的自动氧化<sup>[1]</sup>,在氧化过程中产生的过氧化物、醛、酮、酸、环氧化合物以及其他化合物可能产生异味,降低油的品质,且食用后会导致人体消化系统产生病变,并通过与其他食物成分发生反应增加致癌的风险性<sup>[2]</sup>。因此,准确测定食用植物油中多种微量元素含量具有重要意义。

食用植物油中微量元素可来自植物基因型、土壤、环境、肥料以及含有金属元素的杀虫剂,或来自加工过程中金属元素的污染<sup>[3]</sup>。有关食用植物油中微量元素含量的分析已有大量文献报道,分析方法主要包括原子吸收光谱法(AAS)<sup>[4-6]</sup>、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)<sup>[7-9]</sup>。其中:AAS属于单元素分析方法,不具有高通量分析特性,不适合多元素的快速分析;ICP-OES和ICP-MS结合了电感耦合等离子体(ICP)用于原子化和电离样品的显著特征,均能进行多元素的快速分析,且灵敏度高,检出限低,准确性好,尤其是ICP-MS比ICP-OES具有更低的检出限,成为食用植物油中痕量以及超痕量元素高通量分析的首选方法。然而,在ICP运行过程中需使用高纯氩气为工作气,分析成本高,不利于在生产一线或偏远地区实验室推广使用。微波等离子体-原子发射光谱法(MP-AES)采用磁场耦合微波能量并激发等离子体,实现了高效激发与能量耦合,产生稳定的氮气等离子体,采用空气和氮气为工作气大幅度降低了分析成本<sup>[10-12]</sup>。本文以HNO<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>为消解试剂对食用植物油进行微波消解,采用MP-AES测定其中微量元素Mg、Al、K、Na、Ca、Fe、Cu、Zn、Sr、Mn的含量,以期为食用植物油中多种微量金属元素的快速准确测定提供低成本分析方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

Mg、Al、K、Na、Ca、Fe、Cu、Zn、Sr、Mn 单元素标准溶液(1 000 mg/L), Y、La、Lu 内标溶液(1 000

mg/L), 国药集团化学试剂有限公司; HNO<sub>3</sub> (质量分数 65%)、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (质量分数 30%), 德国 Merck 公司; 食用植物油样品(大豆油、花生油、菜籽油、橄榄油、葵花籽油、芝麻油), 购置于京东超市; 实验用水为超纯水。

Agilent 4200 型 MP-AES 仪(配备 4107 氮气发生器、OneNeb 雾化器、双通道玻璃旋流雾化室、SPS 3 自动进样器、MP Expert 数据处理软件), 美国 Agilent 公司; MARs 5 微波消解仪, 美国 CEM 公司; Milli-Q 超纯水处理系统, 美国 Millipore 公司; Agilent 8800 型 ICP-MS 仪, 美国 Agilent 公司; iCAP7400 ICP-OES 仪, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品处理

准确称取植物油样品 0.5 g (精确到 0.000 1 g) 于微波消解罐中, 依次加入 5 mL HNO<sub>3</sub>、1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 敞开罐盖预消解 30 min 后按所设定的操作条件进行微波消解。消解结束后自然冷却至室温, 打开罐盖, 用超纯水将样品消解溶液转移至 50 mL 聚乙烯容量瓶中定容, 待测。采用相同的处理方法制备空白溶液。

微波消解条件<sup>[13]</sup>: 最大功率 1 600 W, 爬升 3 min, 控制温度 100 °C, 保持 3 min; 最大功率 1 600 W, 爬升 7 min, 控制温度 150 °C, 保持 3 min; 最大功率 1 600 W, 爬升 5 min, 控制温度 170 °C, 保持 3 min; 最大功率 1 600 W, 爬升 5 min, 控制温度 190 °C, 保持 10 min。

#### 1.2.2 MP-AES 测定

采用单元素标准溶液配制 0、10、50、200、1 000 μg/L 的 Al、Fe、Cu、Zn、Sr、Mn 系列混合标准溶液和 0、20、100、400、2 000 μg/L 的 Mg、K、Na、Ca 系列混合标准溶液, 采用 MP-AES 进行测定, 以分析元素的信号强度与内标元素信号强度的比值对标准溶液质量浓度建立校准曲线。同时对样品和空白溶液进行测定, 根据校准曲线利用 MP-AES 自带 MP Expert 软件计算得到样品中分析元素的含量。

MP-AES 条件: RF 功率 1 000 W; 气源为氮气; 雾化气流速 0.45~0.80 L/min; 泵速 15 r/min; 积分时间 3 s; 读数次数 3 次; 冲洗时间 40 s; 稳定时间 20

s;背景校正为快速线性干扰校正(FLIC)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 分析线的选择

氮气作为等离子体工作气,运行成本低且安全性能好(不易燃烧),但与氩等离子体相比,二者具有不同的性能。在氮等离子体中,由于激发温度较低,大多数元素处于比离子态更低的原子态,因此为确保发射光谱信号强度,减少分析元素的光谱干扰,需准确选择各元素的分析波长,以获得高灵敏度并尽量避免光谱干扰。

根据 MP Expert 提供的分析谱线以及相应谱线所存在的其他谱线干扰,对同一元素选择多条谱线进行对比分析,优选动态范围宽、光谱干扰少、谱线信号强度大的谱线为分析线。如 Mg 的可选谱线为 383.829、285.213、279.553 nm,其中 Mg 279.553 nm 会受到 Mn 279.482 nm 和 Mn 279.827 nm 的干扰, Mg 383.829 nm 的灵敏度虽然比 Mg 285.213 nm 低,但 Mg 383.829 nm 的谱线动态范围宽,检出限低且不受光谱干扰,本实验选择 Mg 的分析线为 383.829 nm。Cu 的两条原子线 324.754 nm 和 327.395 nm 均为高灵敏谱线,但两条原子线均面临着光谱干扰,Fe 谱线 324.696 nm 和 324.820 nm 会对 Cu 324.754 nm 构成潜在光谱干扰, Ca 327.467 nm 会对 Cu 327.395 nm 产生干扰,考虑到食用植物油中的 Ca 含量通常比 Fe 高,本实验选择 Cu 324.754 nm 为分析线。其余元素分析线的选择与 Mg、Cu 相似,分别选择 396.152、66.497、588.995、393.366、259.940、213.857、407.771、257.610 nm 作为 Al、K、Na、Ca、Fe、Zn、Sr、Mn 的分析线。

### 2.2 干扰及校正

通过分析波长的选择避免了大量光谱干扰,但仍然存在潜在光谱干扰,并且无法消除基体成分及

等离子体光源本身所发射的强烈杂散光所形成的背景干扰。如本实验选择 Cu 324.754 nm 为分析线则要面临 Fe 的光谱干扰。MP Expert 提供的 FLIC 技术能够自动扣除 Fe 的光谱干扰,同时能自动扣除空白背景干扰(如图 1 所示)。由于所有分析元素都存在背景干扰,本实验对所有分析元素均采用 FLIC 技术校正光谱干扰和背景干扰。

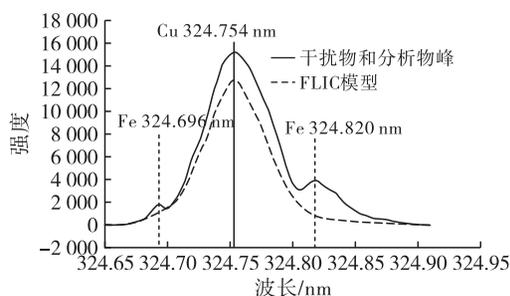


图1 应用 FLIC 技术校正 Cu 324.754 nm 的光谱干扰和背景干扰

基质组成差异会导致溶液比重、黏度及表面张力等物理性质不同,从而影响溶液的雾化效果,进而影响分析谱线强度的精密度和灵敏度,产生基体效应<sup>[14]</sup>。本实验采用内标法进行校正,通过在样品溶液、标准溶液和空白溶液中在线加入 1 mg/L 的 Y、La、Lu 内标元素,借助分析元素与内标元素的信号强度比值来补偿谱线强度变化。考察了未加入内标元素和加入内标元素后样品溶液中分析元素谱线强度的变化,结果见图 2。从图 2(A)可以看出,未加入内标元素时,受基体效应的影响,抑制了所有分析元素的谱线信号强度,分析时间越长,影响越严重。从图 2(B)可以看出,加入内标元素后,所有分析元素的谱线信号强度平稳,表现出良好的长期稳定性,表明加入内标元素可以有效补偿谱线强度变化,校正基体效应。

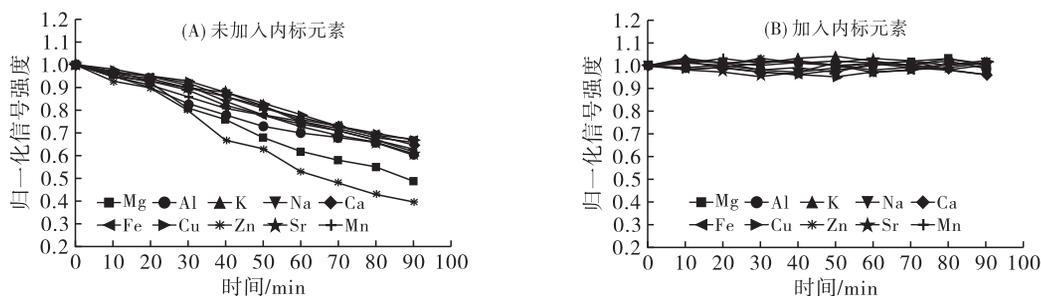


图2 内标元素对基体效应的校正作用

### 2.3 校准曲线与检出限

采用 MP - AES 法测定系列标准溶液,以分析元素的信号强度与内标元素的信号强度的比值对标准溶液质量浓度建立校准曲线并进行线性回归,考

察分析元素的线性关系。分别连续分析空白溶液中各元素的信号强度,计算 11 次测定结果的标准偏差,以 3 倍和 10 倍标准偏差对应质量浓度为各元素的仪器检出限(LOD)和定量限(LOQ)<sup>[15]</sup>,同时采用

GB 5009.268—2016 所规定的 ICP-OES 进行对比分析,结果见表 1。从表 1 可以看出,所有分析元素在各自的线性范围内线性相关系数大于等于 0.999 6,表明所建立的分析方法具有良好的线性关系。MP-AES 的 LOD 为 0.12~4.29  $\mu\text{g/L}$ ,LOQ 为

0.40~14.30  $\mu\text{g/L}$ ,除 Fe 的 LOD 稍高以外,其余分析元素的 LOD 均小于 1.50  $\mu\text{g/L}$ ,多数分析元素的 LOD 低于 ICP-OES,能实现食用植物油中微克级金属元素的测定。

表 1 分析元素的线性回归方程、检出限和定量限

元素	线性回归方程	线性范围/ ( $\mu\text{g/L}$ )	线性相关系数 ( $R$ )	LOD/( $\mu\text{g/L}$ )		LOQ/( $\mu\text{g/L}$ )	
				MP-AES	ICP-OES	MP-AES	ICP-OES
Mg	$y = 2.02 \times 10^{-4}x - 1.83 \times 10^{-3}$	3.83 ~ 2 000	0.999 9	1.15	4.06	3.83	13.50
Al	$y = 5.57 \times 10^{-3}x - 2.71 \times 10^{-2}$	2.37 ~ 1 000	0.999 8	0.71	5.31	2.37	17.70
K	$y = 7.28 \times 10^{-3}x - 1.01 \times 10^{-2}$	4.54 ~ 2 000	1.000 0	1.36	9.75	4.54	32.50
Na	$y = 1.97 \times 10^{-3}x - 6.91 \times 10^{-3}$	3.38 ~ 2 000	0.999 9	1.04	3.12	3.38	10.40
Ca	$y = 3.92 \times 10^{-2}x - 3.13 \times 10^{-3}$	1.90 ~ 2 000	0.999 7	0.57	2.13	1.90	7.10
Fe	$y = 1.65 \times 10^{-3}x - 7.06 \times 10^{-2}$	36.30 ~ 1 000	0.999 8	4.29	4.40	14.30	14.80
Cu	$y = 1.03 \times 10^{-3}x - 1.22 \times 10^{-2}$	4.01 ~ 1 000	0.999 9	1.21	0.98	4.01	3.27
Zn	$y = 1.85 \times 10^{-4}x - 6.15 \times 10^{-3}$	4.76 ~ 1 000	0.999 6	1.43	1.23	4.76	4.10
Sr	$y = 8.75 \times 10^{-3}x + 1.43 \times 10^{-3}$	0.40 ~ 1 000	1.000 0	0.12	0.64	0.40	2.12
Mn	$y = 6.06 \times 10^{-3}x - 1.34 \times 10^{-3}$	0.88 ~ 1 000	0.999 8	0.26	1.20	0.88	4.00

#### 2.4 方法的准确性和精密度

为评价 MP-AES 的分析性能,将一个食用植物油样品分成两份,一份经微波消解后分别采用 MP-AES 和 GB 5009.268—2016 所规定的 ICP-MS 平行测定 6 次,计算各元素的相对标准偏差 (RSD),并采用  $t$  检验法对两种分析方法进行单向统计学结果分析,根据  $p$  值判定检验结果;另一份加

入各元素标准溶液后进行微波消解,采用 MP-AES 平行测定 6 次,计算各元素的加标回收率,结果见表 2。从表 2 可以看出,在 95% 的置信度水平,MP-AES 与 ICP-MS 的测定结果无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),各元素的加标回收率在 95.4%~104.0% 之间,RSD 在 2.7%~4.1% 之间 ( $RSD < 5\%$ ),表明 MP-AES 准确性好,精密度高。

表 2 MP-AES 和 ICP-MS 的对比分析结果

元素	MP-AES					ICP-MS		$p$
	测定值/( $\mu\text{g/g}$ )	RSD/%	加标值/ ( $\mu\text{g/g}$ )	加标测定值/ ( $\mu\text{g/g}$ )	加标回收率/ %	测定值/( $\mu\text{g/g}$ )	RSD/%	
Mg	6.51 $\pm$ 0.20	3.1	5.00	11.40	97.8	6.60 $\pm$ 0.23	3.5	0.24
Al	3.59 $\pm$ 0.10	2.8	5.00	8.36	95.4	3.55 $\pm$ 0.12	3.4	0.27
K	46.80 $\pm$ 1.92	4.1	50.0	98.10	102.6	47.50 $\pm$ 1.30	2.7	0.24
Na	84.30 $\pm$ 3.14	3.7	50.0	136.00	103.4	86.00 $\pm$ 2.76	3.2	0.17
Ca	50.80 $\pm$ 1.83	3.6	50.0	102.00	102.4	51.60 $\pm$ 0.93	1.8	0.18
Fe	21.00 $\pm$ 0.57	2.7	20.0	40.30	96.5	21.30 $\pm$ 0.45	2.1	0.17
Cu	2.64 $\pm$ 0.08	3.0	5.00	7.82	103.6	2.62 $\pm$ 0.05	1.9	0.31
Zn	4.10 $\pm$ 0.12	2.9	5.00	9.01	98.2	4.21 $\pm$ 0.10	2.4	0.06
Sr	1.67 $\pm$ 0.05	3.0	2.00	3.58	95.5	1.70 $\pm$ 0.03	1.8	0.12
Mn	0.37 $\pm$ 0.01	2.7	0.50	0.89	104.0	0.38 $\pm$ 0.01	2.6	0.06

#### 2.5 食用植物油样品分析

采用 MP-AES 对 6 种瓶装食用植物油(大豆油、花生油、菜籽油、橄榄油、葵花籽油、芝麻油)进行分析,每个样品平行测定 6 次,结果见表 3。从表 3 可以看出,6 种瓶装食用植物油中的金属元素含量

差异较大,花生油中 Mg、K、Na、Fe、Zn、Mn 含量明显高于其他食用植物油,芝麻油中 Ca 含量明显高于其他食用植物油,葵花籽油中的 Cu 含量明显高于其他食用植物油,几种植物油中的 Al、Sr、Mn 的含量均处于较低水平。

表3 MP-AES法对食用植物油样品分析结果( $n=6$ )

元素	大豆油	菜籽油	橄榄油	花生油	葵花籽油	芝麻油
Mg	6.51 ± 0.20	1.17 ± 0.04	4.23 ± 0.13	57.20 ± 1.21	1.83 ± 0.07	3.71 ± 0.10
Al	3.59 ± 0.10	2.06 ± 0.07	1.64 ± 0.05	1.25 ± 0.04	2.07 ± 0.06	0.93 ± 0.03
K	46.80 ± 1.92	37.20 ± 1.04	60.90 ± 2.76	158.00 ± 4.38	11.60 ± 0.34	53.40 ± 1.62
Na	84.30 ± 3.14	45.10 ± 1.30	75.30 ± 3.11	379.00 ± 10.2	14.00 ± 0.45	76.10 ± 0.40
Ca	50.80 ± 1.83	20.50 ± 0.66	12.00 ± 0.38	53.30 ± 1.46	9.20 ± 0.28	103.00 ± 3.91
Fe	21.00 ± 0.57	34.30 ± 1.15	10.10 ± 0.37	51.00 ± 1.60	10.30 ± 0.30	45.00 ± 1.16
Cu	2.64 ± 0.08	1.76 ± 0.06	0.96 ± 0.04	0.84 ± 0.03	4.41 ± 0.15	2.62 ± 0.08
Zn	4.10 ± 0.12	3.20 ± 0.10	1.45 ± 0.05	7.01 ± 0.20	0.87 ± 0.03	5.05 ± 0.17
Sr	1.67 ± 0.05	0.50 ± 0.02	0.74 ± 0.03	1.22 ± 0.05	0.65 ± 0.03	1.49 ± 0.06
Mn	0.37 ± 0.01	0.66 ± 0.03	0.78 ± 0.04	3.13 ± 0.12	1.20 ± 0.05	0.88 ± 0.04

食用植物油是人们日常膳食必不可少的部分,其总体质量通常根据有机成分来确定,虽然也能为人体补充必需微量金属元素,但为减少食用植物油在加工和储存过程中的氧化,应尽量降低食用植物油中微量金属元素的含量。

### 3 结论

利用微波等离子体-原子发射光谱法(MP-AES)能同时测定食用植物油中的10种微量金属元素。通过选择各元素的分析波长避免了大量光谱干扰,利用快速线性干扰校正(FLIC)技术能同时校正光谱干扰和背景干扰,选择Y、La、Lu为内标元素校正基体效应。食用植物油样品经微波消解后采用MP-AES测定可以获得稳定的分析信号和准确的分析结果,各元素的检出限(LOD)为0.12~4.29 μg/L,加标回收率在95.4%~104.0%之间,RSD小于等于4.1%。本方法无需使用昂贵的高纯氩气,分析运行成本低,无需使用易燃或氧化性气体,安全性高,为食用植物油中微量金属元素的高通量分析提供了经济可靠的新方法。

### 参考文献:

- [1] KECELI T, GORDON M H. Ferric ions reduce the antioxidant activity of the phenolic fraction of virgin olive oil [J]. *J Food Sci*, 2002, 67: 943-947.
- [2] CHOE E, MIN D B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2006, 5: 169-186.
- [3] ZEINER M, STEFFAN I, CINDRIC I J. Determination of trace elements in olive oil by ICP-AES and ETA-AAS: a pilot study on the geographical characterization [J]. *Microchem J*, 2005, 81: 171-176.
- [4] CANARIO C M, KATSKOV D A. Direct determination of Cd and Pb in edible oils by atomic absorption spectrometry with transverse heated filter atomizer [J]. *J Anal Atom Spectrom*, 2005, 20(12): 1386-1388.
- [5] 邱会东, 赵波, 张红, 等. 食用植物油中重金属分析方法的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2017, 42(1): 76-79.
- [6] MENDIL D, ULUOZLU O D, TUZEN M, et al. Investigation of the levels of some element in edible oil samples produced in Turkey by atomic absorption spectrometry [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 165: 724-728.
- [7] 郭岚, 谢明勇, 鄢爱平, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法用于植物油多元素同步测定研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(11): 2345-2348.
- [8] BENINCASA C, LEWIS J, PERRI E, et al. Determination of trace element in Italian virgin olive oils and their characterization according to geographical origin by statistical analysis [J]. *Anal Chim Acta*, 2007, 585: 366-370.
- [9] HE Y M, CHEN J J, ZHOU Y, et al. Extraction induced by emulsion breaking for trace multi-element determination in edible vegetable oils by ICP-MS [J]. *Anal Methods*, 2014, 6(14): 5105-5111.
- [10] LLWERYA K L, MCSWEENEY T, ADHIKARI S P, et al. Signal correction using molecular species to improve biodiesel analysis by microwave-induced plasma optical emission spectrometry [J]. *Microchem J*, 2016, 129: 58-62.
- [11] 郭鹏然, 潘佳钊, 雷永乾, 等. 微波等离子体原子发射光谱新技术同时测定环境水样中多种元素 [J]. *分析化学*, 2015, 43(5): 748-753.
- [12] CARVALHO L S B, SILVA C S, NOBREGA J A, et al. Microwave induced plasma optical emission spectrometry for multielement determination in instant soups [J/OL]. *J Food Compos Anal*, 2020, 86: 103376 [2020-07-22]. <https://doi.org/10.1016/j.fca.2019.103376>.
- [13] 张萍, 刘宏伟. 微波等离子体原子发射光谱法测定食用坚果油中的金属元素 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(18): 215-218, 225.
- [14] 杨开放. ICP-OES常见干扰类型及校正方法探讨 [J]. *分析化学计量*, 2016, 25(3): 73-76.
- [15] BALCAEN L, BOLEA-FERNANDEZ E, RESANO M, et al. Accurate determination of ultra-trace levels of Ti in blood serum using ICP-MS/MS [J]. *Anal Chim Acta*, 2014, 809: 1-8.