

1,4-丁二醇中的39种金属元素的检测方法

李清霞^{*#}, 梁 斌^{*}, 张勇娟, 梁亚娟, 胜继伟

新迈奇材料股份有限公司产研院, 河南 濮阳

收稿日期: 2025年4月27日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年7月7日

摘 要

建立了一种快速测定1,4-丁二醇中39种痕量金属元素的检测方法。使用电感耦合等离子体质谱检测有机物时, 加入氧气, 减少积碳, 避免熄火。雾化室温度需设定为2℃, 提供稳定的进样环境。1,4-丁二醇, 黏稠且凝固点为20.1℃, 与N-甲基吡咯烷酮混合后, 混合物可以直接进样检测分析, 从而减少预处理的检测误差。加标回收率在92.21%~105.96%之间, 验证了方法的准确性。此方法检测1,4-丁二醇中的金属元素, 具有高效、干扰小、污染少、灵敏度高的优点。

关键词

1,4-丁二醇, 电感耦合等离子体质谱, N-甲基吡咯烷酮, 金属元素

Method for Detecting 39 Metals in 1,4-Butanediol

Qingxia Li^{*#}, Bin Liang^{*}, Yongjuan Zhang, Yajuan Liang, Jiwei Sheng

Industrial Research Institute of Xinmaiqi Materials Co., Ltd., Puyang Henan

Received: Apr. 27th, 2025; accepted: Jun. 30th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

A rapid detection method for 39 trace metal elements in 1,4-butanediol was established. When using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) to detect organic substances, oxygen is added to reduce carbon deposition and avoid flameout. The temperature of the nebulization chamber should be set at 2℃ to provide a stable sample introduction environment. 1,4-butanediol is viscous with a freezing point of 20.1℃. After mixing it with N-methylpyrrolidone, the mixture can be directly injected for detection and analysis, thus reducing the detection errors caused by sample

^{*}共同第一作者。

[#]通讯作者。

pretreatment. The recoveries of the spiked samples range from 92.21% to 105.96%, which verifies the accuracy of the method. This method for detecting metal elements in 1,4-butanediol has the advantages of high efficiency, less interference, low pollution, and high sensitivity.

Keywords

1,4-Butanediol, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, N-Methylpyrrolidone, Metal Elements

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1,4-丁二醇(1,4-Butanediol, 简写 BDO), 分子式为 $C_4H_{10}O_2$, 分子量为 90.12, 外观为无色或淡黄色黏稠状液体, 凝固点 $20.1^{\circ}C$ 。BDO 是一种重要的精细化工基础原料, 广泛应用于医药、化工、纺织、造纸、汽车和日用化学品等领域。BDO 的下游产品有 γ -丁内酯、四氢呋喃、聚氨酯树脂、增塑剂, 并作为溶剂和电镀行业的增亮剂等[1]-[3]。随着 1,4-丁二醇(BDO)的应用领域不断拓展, 对其生产过程中金属元素的准确、高效定量分析需求日益增加。然而, 目前关于 BDO 中金属元素分析检测方法的研究文献仍较为匮乏。

当前, 金属元素的检测技术主要分为四类: 原子吸收光谱(AAS)[4]、原子荧光光谱法(AFS)、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)[5]。其中, 原子吸收光谱法(AAS)通过使用与目标元素匹配的特征波长光线, 使电子从基态跃迁至高能级状态。在此方法中, 吸光度与目标元素的浓度呈正相关关系。然而, 该方法的应用范围相对有限, 在检测不同元素时需更换光源灯, 且样品预处理步骤繁琐, 检测限通常处于较大($\geq 1 \text{ mg/L}$)水平。原子荧光光谱法(AFS)易受到荧光猝灭效应和散射光干扰的影响, 并且难以实现多元素的同时分析。电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)通常被认为是电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的早期技术版本, 其能够实现多元素的同时分析, 尤其适用于低浓度金属元素的检测[6]。电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)以其高效性、稳定性以及较少的化学干扰等优势, 被广泛用于测定有机物中金属元素的定量分析[7]-[9]。随着科研人员的持续深入研究以及分析仪器技术的快速进步, ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)已在半导体、合金、矿石、水资源、食品、日化产品及药品等多个领域中, 被广泛用作检测金属元素含量的重要仪器[10]-[12]。

目前, 液体有机物的检测分析通常采用湿法消解、微波消解、稀释等方法去除有机质, 随后利用 ICP-MS 进行金属元素的检测。然而, 针对 BDO 中金属元素含量的测定, 采用 ICP-MS 技术的相关报道较为有限。由于 BDO 中金属元素含量较低, 加之繁琐的样品消解过程以及纯水稀释带来的干扰, 可能导致测定结果误差较大。相比之下, 使用有机溶剂进行样品稀释不仅可以有效控制污染来源, 还能显著减少因水引入的测定误差。基于此, 本研究选用有机溶剂 NMP 对 BDO 样品进行稀释处理, 并直接进样通过 ICP-MS 进行检测分析[13][14], 并开展了检出限、精密度、加标回收率等方法验证。建立的此分析方法为 BDO 质量控制和应用提供科学依据。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

电感耦合等离子体质谱仪 7800: 美国安捷伦科技有限公司

制水机 pro: 德国赛多利斯
移液枪 E4XLS: 瑞士梅特勒托利多
枪头 BioClean Ultra: 瑞士梅特勒托利多
多元素混合标准溶液 8500-6940 (10 µg/L): 美国安捷伦科技有限公司
试剂瓶(PFA): 日本亚速旺
天平(十万分之一): 瑞士梅特勒托利多
硝酸(65%): 德国默克
氩气(99.999%): 濮阳市鑫源化工器材有限公司
氦气(99.999%): 濮阳市鑫源化工器材有限公司
氩氧混合气(20%O, 80%Ar): 濮阳市鑫源化工器材有限公司
N-甲基吡咯烷酮(99.92%): 新迈奇材料股份有限公司
一四丁二醇(99.71%): 陕西延长石油集团

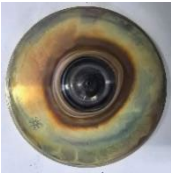
2.2. 检测环境

因检测结果属于痕量级别，在普通的环境中容易对某些金属元素造成污染，避免引起检测误差，稀释样品、配置标准溶液、检测分析全程在百级洁净室内进行，并佩戴丁腈手套。

2.3. 加氧检测

ICP-MS 分析有机样品时，雾化室需要冷却到 2℃ [15]，减少溶剂蒸汽进入等离子体，为气溶胶提供稳定的环境，保证气溶胶的均匀性，提高等离子体的稳定性和离子化效率，提高灵敏度和分析结果的稳定性。检测过程中，需要加入辅助气体氧气，减少锥孔积碳，避免熄火。加氧前后锥的积碳情况具体见表 1。

Table 1. The changes of the cone before and after oxygenation
表 1. 加氧前后的锥的变化

	加氧前	加氧后
采样锥		
截取锥		

2.4. NMP 稀释 BDO

BDO 为无色粘稠油状液体，凝固点 20.1℃。在低温环境下直接进样时，BDO 容易凝固，导致管路和雾化器堵塞。因此，本研究选择用 N-甲基吡咯烷酮(NMP)对 BDO 稀释处理后进样。NMP 的凝固点为 -24.4℃，极性 强，能与 BDO 完全互溶，有效降低 BDO 的黏度。BDO 与 NMP 按照 1:1 比例混合后，在

2℃时未出现凝固, 可以正产进样并完成检测分析。

BDO 用水稀释, 因为所检样品中存在 H₂O, 形成气溶胶的过程中可能会有少量的水进入到等离子体中心, 会对某些金属离子造成干扰, 会发生简单的化学反应, 如 35Cl 和 16O = 51ClO (51ClO = 51V 信号叠加), 水稀释后砷的检测值偏高, 加标回收率约 690%, 造成砷(V)的检测误差, 结果见表 2。

Table 2. Detection error of vitriol
表 2. 砷的检测误差

元素	水稀释加标前	水稀释加 1 µg/L 标液	水稀释加标 回收率	NMP 稀释 加标前	NMP 稀释 加 1 µg/L 标液	NMP 稀释 加标回收率
砷/V(µg/L)	0.2001		697.7200	0.0258		100.1500
	0.1859	7.1773	699.1400	0.0231	1.0273	100.4200
	0.2480		692.9300	0.0266		100.0700

2.5. 标准曲线的绘制

采用标准加入法, 在 BDO 与 NMP 混合液(1:1)中加入多元素混合标准溶液, 配制浓度为 0.5 µg/L, 1 µg/L, 5 µg/L, 10 µg/L, 校准曲线由原始样品和各个加多元素标准溶液后样品的响应计数值(cps)与样品浓度绘图制得, 未知样品的浓度通过反向延长校准曲线, 得到 X 轴截距而得到未知样品浓度。

2.6. 仪器工作条件

利用 ICP-MS 检测有机物时, 若采用直接进样方法, 则需配置有机进样系统及氧气引入装置。通过氧气与有机物中的碳元素反应生成二氧化碳并排出, 可有效减少碳元素对检测结果的干扰误差。同时, 采用干燥纯净的 He 气碰撞模式, 能够去除潜在干扰物, 从而显著改善 Cr52、Fe56、Cu63 和 As75 的测量精度。此外, 使用 1.0 mm 内径的中心管可减少有机物挥发物进入等离子体的可能性; 选用铂锥, 降低锥体损耗; PFA 雾化器以及耐有机溶剂的管路系统。具体工作参数见表 3。

Table 3. Working parameters of ICP-MS
表 3. 电感耦合等离子体质谱仪工作参数

仪器参数	设定值	仪器参数	设定值
射频功率/W	1550W	采样深度/mm	8
载气 Ar 流量/(L·min ⁻¹)	0.5	同心雾化器材质	PFA
可选气 Ar 流量/(L·min ⁻¹)	15	炬管材质	石英
碰撞气体 He 流量/(L·min ⁻¹)	2	采样锥材质	Pt
辅助气 ArO 流量/(L·min ⁻¹)	0.2	截取锥材质	Pt
冲洗泵速/(r·min ⁻¹)	0.5	透镜电压/V	10
分析泵速/(r·min ⁻¹)	0.1	偏转电压/V	-90
样品引入时间(s)	30		

3. 结果与讨论

3.1. 线性关系和检出限

在 100 mL 全氟烷氧基树脂(PFA)瓶中加 1:1 的 BDO 与 NMP 的混合液作为 0 µg/L, 之后加入混合标

准溶液, 分别浓度为 0.5 $\mu\text{g/L}$, 1 $\mu\text{g/L}$, 5 $\mu\text{g/L}$, 10 $\mu\text{g/L}$, 以各元素浓度为横坐标, 以待测元素 cps 计数值为纵坐标, 做标准曲线, 结果显示 39 种金属元素在其浓度范围内线性关系良好, 具体结果见表 4 与表 5。

Table 4. The cps counts of each element at different concentrations

表 4. 各元素在不同浓度的 cps 计数值

	cps 计数值				
	0 $\mu\text{g/L}$	0.5 $\mu\text{g/L}$	1 $\mu\text{g/L}$	5 $\mu\text{g/L}$	10 $\mu\text{g/L}$
锂/Li	54.45	3590.47	7107.37	36508.14	73806.45
铍/Be	2.22	1300.07	2841.41	14045.63	28510.78
硼/B	790.03	1541.21	2389.11	9956.77	20324.03
钠/Na	7738.77	13236.07	18722.06	59294.47	112526.64
镁/Mg	2.22	125.56	254.45	1597.88	3107.03
铝/Al	3.33	50.00	106.67	635.58	1134.50
钾/K	61.11	122.23	261.12	1393.41	2602.48
钙/Ca	60.00	192.23	316.68	1427.86	2513.58
钛/Ti	727.81	1200.06	1584.55	5630.04	10490.57
钒/V	601.86	6270.33	12822.81	63471.03	129305.34
铬/Cr	108.89	334.45	554.46	2220.20	4399.61
锰/Mn	268.95	4674.23	9086.38	44224.58	87189.87
铁/Fe	196.67	1987.94	6819.02	18466.40	36575.42
钴/Co	10.00	6045.78	12784.70	65033.26	132163.10
镍/Ni	81.11	1004.49	1903.54	8753.86	17339.54
铜/Cu	327.51	3439.34	7335.07	36346.52	73285.34
锌/Zn	17.78	637.80	1222.29	5943.52	11758.28
锗/Ge	28.89	1397.91	2852.55	13830.18	27760.48
砷/As	3774.98	6034.89	7795.56	24290.91	45199.45
铷/Rb	112.22	6035.81	12194.26	62082.54	125782.94
锶/Sr	2.22	8215.83	16932.50	87840.53	176610.17
锆/Zr	1.11	5615.62	11456.99	57072.99	115713.72
铌/Nb	4.44	10720.84	21359.70	106444.49	213400.32
铑/Rh	2.22	11691.67	24147.70	121148.74	245911.07
银/Ag	1.11	3826.13	8046.87	40405.29	82563.28
钯/Pd	3.33	3092.61	6379.33	32122.73	64596.00
镉/Cd	0	808.92	1600.12	8418.19	16435.39
铟/In	4.44	12941.72	26347.40	132260.87	267808.46
锡/Sn	5.55	2664.73	5440.03	28219.98	56698.05
锑/Sb	1.11	4071.76	8532.72	42802.98	87885.82
铯/Cs	103.33	11685.11	23406.82	119172.01	241654.28

续表

钡/Ba	31.11	1503.43	3037.05	14969.44	30589.96
钽/Ta	3.33	21129.12	43186.75	215583.33	434993.08
钨/W	2.22	5737.97	11452.82	57344.96	115507.16
铂/Pt	6.66	2466.93	5135.49	25100.72	50883.62
金/Au	0	4354.10	8905.32	44914.27	88914.48
铊/Tl	5.56	13716.18	27956.66	139275.38	280939.26
铅/Pb	5.67	9638.23	19693.12	98244.13	198700.15
铋/Bi	26.67	16824.30	33963.09	168463.70	337456.57

用 PFA 瓶中的 BDO 与 NMP 混合液, 做空白, 39 种元素扫描 11 次, 以仪器工作站自动算出的标准偏差, 根据方法检出限计算方法, 计算出方法检出限[16], 具体结果见表 5。

检出限(MDL)计算公式为:

$$MDL = 3S/k$$

式中, S 为标准偏差, k 为斜率

Table 5. Standard curve relationship, detection limit and precision

表 5. 标准曲线关系、检出限、精密度

元素	线性方程	相关系数/ r	方法检出限/ $(\mu\text{g/L})$	精密度 RSD/%
锂/Li	$Y = 7355.3218x + 54.4467$	1	0.0001	0.1661
铍/Be	$Y = 2841.9071x + 2.2200$	1	0.0001	0.0340
硼/B	$Y = 1925.9271x + 790.0333$	0.9995	0.0001	0.4355
钠/Na	$Y = 10450.5985x + 7738.7733$	0.9999	0.0001	0.2452
镁/Mg	$Y = 311.6281x + 2.2200$	0.9997	0.0001	0.0012
铝/Al	$Y = 196.7623x + 376.6767$	0.9992	0.0006	0.0002
钾/K	$Y = 256.0895x + 61.1133$	0.9994	0.0003	0.2152
钙/Ca	$Y = 245.6153x + 60.0000$	1	0.0003	0.0002
钛/Ti	$Y = 976.0927x + 727.8067$	0.9999	0.0002	2.8844
钒/V	$Y = 12803.9282x + 601.8567$	0.9999	0.0001	0.1932
铬/Cr	$Y = 427.8974x + 108.8933$	0.9999	0.0003	0.1381
锰/Mn	$Y = 8712.9306x + 268.9467$	1	0.0001	0.6018
铁/Fe	$Y = 3640.9725x + 196.6700$	1	0.0001	0.1746
钴/Co	$Y = 13167.8405x + 10.0000$	1	0.0001	0.0179
镍/Ni	$Y = 1728.5712x + 81.1133$	1	0.0002	0.4391
铜/Cu	$Y = 7273.1630x + 327.5100$	1	0.0001	0.0665
锌/Zn	$Y = 1176.6195x + 17.7800$	1	0.0001	0.1606
锆/Ge	$Y = 2770.9353x + 28.8867$	1	0.0001	0.0685
砷/As	$Y = 4134.4540x + 3774.9833$	1	0.0001	1.6113

续表

铷/Rb	$Y = 12527.5454x + 112.2233$	1	0.0001	0.0544
锶/Sr	$Y = 17634.1238x + 2.2233$	1	0.0001	0.0382
锆/Zr	$Y = 11538.6073x + 1.1100$	1	0.0001	0.0082
铌/Nb	$Y = 21329.2865x + 4.4433$	1	0.0001	0.0112
铑/Rh	$Y = 24513.3561x + 2.2233$	1	0.0001	0.0075
银/Ag	$Y = 8218.6207x + 1.1100$	1	0.0001	0.0879
钯/Pd	$Y = 6451.0438x + 3.3333$	1	0.0001	0.0129
镉/Cd	$Y = 1651.0848x + 0.0000E + 000$	0.9999	0.0001	0.0014
铟/In	$Y = 26709.9717x + 4.4433$	1	0.0001	0.0120
锡/Sn	$Y = 5661.4749x + 5.5533$	1	0.0001	0.0289
锑/Sb	$Y = 8739.9876x + 1.1100$	0.9999	0.0001	0.0014
铯/Cs	$Y = 24078.7900x + 103.3333$	1	0.0001	0.0206
钡/Ba	$Y = 3041.7600x + 31.1100$	0.9999	0.0001	0.0149
钽/Ta	$Y = 43418.1690x + 3.3333$	1	0.0001	0.0049
钨/W	$Y = 11513.3195x + 2.2200$	1	0.0001	0.0067
铂/Pt	$Y = 5074.0501x + 6.6633$	1	0.0001	0.0186
金/Au	$Y = 8980.5827x + 0.0000E + 000$	1	0.0001	0.0051
铊/Tl	$Y = 28043.5055x + 5.5567$	1	0.0001	0.0189
铅/Pb	$Y = 19822.8900x + 5.6677$	1	0.0001	0.0111
铋/Bi	$Y = 33733.2235x + 26.6677$	1	0.0001	0.0047

由以上结果, 各元素线性关系良好, 相关系数在 0.9990~1.0000 之间, 检出限小于 0.001 $\mu\text{g/L}$ 。复测后, 检测数据显示仪器精密度 RSD 值小于 5。根据 GB/T39486-2020 电感耦合等离子体质谱分析方法通则要求, 所检元素含量小于 1 $\mu\text{g/L}$ 时, 精密度 RSD 值小于 15, 所选方法满足检测要求。

3.2. 加标回收率

将各金属元素浓度为 1 $\mu\text{g/L}$ 混合标准溶液加入在装有 BDO 与 NMP 的混合液的 PFA 瓶中, 将各元素扫描 11 次检测所得值, 做加标回收率, 结果见表 6。

Table 6. The standard recovery rate of each element

表 6. 各元素的加标回收率

测定元素	本底值/ $(\mu\text{g/L})$	加标量/ $(\mu\text{g/L})$	测定值/ $(\mu\text{g/L})$	回收率/%
锂/Li	0.0103	1	1.0290	101.87
铍/Be	0.0012	1	1.0221	102.09
硼/B	0.2515	1	1.2688	101.73
钠/Na	0.8888	1	1.9041	101.53
镁/Mg	0.0143	1	0.9520	93.77

续表

铝/Al	0.0192	1	0.9413	92.21
钾/K	0.2213	1	1.1628	94.15
钙/Ca	0.2124	1	1.1459	93.35
钛/Ti	0.8390	1	1.7827	94.37
钒/V	0.0258	1	1.0273	100.15
铬/Cr	0.2727	1	1.2101	93.74
锰/Mn	0.0295	1	0.9669	93.74
铁/Fe	0.0543	1	1.0935	103.92
钴/Co	0.0015	1	1.0085	100.7
镍/Ni	0.0681	1	1.0260	95.79
铜/Cu	0.0136	1	1.0605	104.69
锌/Zn	0.0349	1	1.0945	105.96
锗/Ge	0.0136	1	1.0648	105.12
砷/As	0.9746	1	1.9621	98.75
铷/Rb	0.0085	1	1.0191	101.06
锶/Sr	0.0002	1	0.9913	99.11
锆/Zr	0.0023	1	1.0054	100.31
铌/Nb	0.0002	1	1.0054	100.52
铑/Rh	0.0004	1	0.9941	99.37
银/Ag	0.0019	1	0.9810	97.91
钯/Pd	0.0005	1	1.0139	101.34
镉/Cd	0.0007	1	1.0223	102.16
铟/In	0.0010	1	1.0248	102.38
锡/Sn	0.0031	1	1.0080	100.49
锑/Sb	0.0013	1	0.9970	99.57
铯/Cs	0.0036	1	1.0062	100.26
钡/Ba	0.0073	1	1.0196	101.23
钽/Ta	0.0001	1	1.0281	102.8
钨/W	0.0008	1	1.0230	102.22
铂/Pt	0.0004	1	1.0222	102.18
金/Au	0.0006	1	1.0337	103.31
铊/Tl	0.0011	1	1.0025	100.14
铅/Pb	0.0006	1	1.0135	101.29
铋/Bi	0.0006	1	1.0239	102.33

由以上结果看出, 加标回收率在 92.21%~105.96%, 符合 GB39486-2020 中待测元素含量对应的正确度范围。

4. 结论

BDO 与 NMP 混和后, 凝固点升高了, 采用 ICP-MS 直接进样, 测定 1,4-丁二醇中的 39 种金属元素。线性相关系数在 0.9990~1.0000 之间, 加标回收率 92.21%~105.96%, 结果表明, 此检测方法高效、误差小、干扰小, 此方法适用于凝固点低的有机物中金属元素的检测。

参考文献

- [1] 魏国玉, 侯艺琳. Reppe 法 1,4-丁二醇铜铈催化剂国产应用[J]. 上海化工, 2024, 49(4): 29-32.
- [2] 吴慧玲, 孟令臣, 张思琦, 等. 1,4-丁二醇制备 γ -丁内酯脱氢工艺[J]. 石油化工, 2025, 54(3): 297-303.
- [3] Raju, M.A., Gidyonu, P., Nagaiah, P., Rao, M.V., Raju, B.D. and Rao, K.S.R. (2019) Mesoporous Silica-Supported Copper Catalysts for Dehydrogenation of Biomass-Derived 1,4-Butanediol to Gamma Butyrolactone in a Continuous Process at Atmospheric Pressure. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **9**, 719-726. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00406-4>
- [4] 杨虹. 原子吸收光谱法在测定水中重金属的应用研究[J]. 山西化工, 2021, 41(5): 74-77.
- [5] 冯先进, 郑国经. 电感耦合等离子体发射光谱与质谱分析技术和应用研究进展[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(3): 353-362.
- [6] Mdululi, N.S., Nomngongo, P.N. and Mketi, N. (2024) Ionic Liquid Assisted Extraction Induced by Emulsion Breaking for Extraction of Trace Metals in Diesel, Gasoline and Kerosene Prior to ICP-OES Analysis. *Heliyon*, **10**, e26605. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26605>
- [7] Hirata, T., Kobayashi, K., Khoo, H.H., Shikino, O. and Asanuma, H. (2024) Detection of Several Volatile Organic Compounds through Ar^+ Induced Chemical Ionisation Using Inductively Coupled Plasma-Tandem Mass Spectrometry (ICP-MS/MS). *The Analyst*, **149**, 5174-5183. <https://doi.org/10.1039/d4an00996g>
- [8] 汤地生, 杨婉晴, 张宇, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定高钨基体样品中稀土元素的含量[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(4): 457-463.
- [9] 黄丹宇. 电感耦合等离子体质谱法测定镁合金中的微量元素[J]. 分析测试技术与仪器, 2023, 29(3): 328-333.
- [10] Lossow, K., Schlörmann, W., Tuchtenhagen, M., Schwarz, M., Schwerdtle, T. and Kipp, A.P. (2023) Measurement of Trace Elements in Murine Liver Tissue Samples: Comparison between ICP-MS/MS and TXRF. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, **78**, Article 127167. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127167>
- [11] Sim, K.S., Kim, H., Hur, S.H., Na, T.W., Lee, J.H. and Kim, H.J. (2024) Geographical Origin Discriminatory Analysis of Onions: Chemometrics Methods Applied to ICP-OES and ICP-MS Analysis. *Food Research International*, **175**, Article 113676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113676>
- [12] 万曦, 田海花, 刘涌, 等. ICP-MS 测定电子级丙二醇甲醚中的钠、镁、钙、铁和铅含量[J]. 2023, 42(1): 90-94.
- [13] 张文媚, 吕玉平, 闻环, 等. 有机溶剂稀释-电感耦合等离子体发射质谱法测定原油砷含量[J]. 广东化工, 2022, 49(3): 179-181.
- [14] 李丹. 基于有机溶剂前处理的 ICP-MS 法直接测定盐酸溴己新中的汞含量[J]. 广州化工, 2025, 53(8): 160-163.
- [15] 张磊, 唐辉, 王辉, 等. 电感耦合等离子体质谱法直接测定有机相中痕量锆[J]. 质谱学报, 2015, 36(2): 156-160.
- [16] 李春华, 陈鹰, 韩宝英, 等. 化学试剂 电感耦合等离子体质谱分析方法通则: GB/T 39486-2020 [S]. 2020.