

微波消解-电感耦合等离子体质谱法快速检测土壤中 12 种重金属

夏兵^{1,*}

1. 上海市环境科学研究院, 上海市 200233

摘要: 为建立土壤中多种重金属元素的高效检测方法, 本研究采用硝酸-盐酸-氢氟酸-高氯酸四酸消解体系结合电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 技术, 实现了土壤样品中镉 (Cd)、钴 (Co)、铜 (Cu) 等 12 种重金属元素的同时测定。通过优化样品前处理消解程序及 ICP-MS 的射频功率、雾化气流速等关键参数, 并引入内标元素 (¹⁸⁵Re、¹⁰³Rh) 校正基体干扰, 显著提升了方法稳定性和内标回收率。实验表明: 各元素校准曲线线性良好 (相关系数 $R^2 > 0.999$), 方法检出限为 0.01~0.5 mg/kg, 加标回收率为 75.7%~112%, 相对标准偏差 (RSD) 为 2.7%~5.2%。采用国家一级土壤成分分析标准物质 (GBW07407) 验证方法正确度, 测定值均在标准值质控范围内。本方法灵敏度高、重复性好, 可为土壤环境监测及污染风险评估提供可靠技术支持, 适用于大批量土壤样品的多元素同步快速检测。

关键词: 微波消解法; 电感耦合等离子体质谱仪; 四酸消解; 重金属

Rapid Detection of 12 Heavy Metals in Soil by Microwave Digestion-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

XIA Bing^{1,*}

1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233

Abstract: To establish an efficient detection method for multiple heavy metal elements in soil, this study employed a four-acid digestion system (HNO₃-HCl-HF-HClO₄) combined with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), achieving simultaneous determination of 12 heavy metal elements including cadmium (Cd), cobalt (Co), copper (Cu), and others in soil samples. Through optimization of key parameters including sample digestion procedures, RF power, and nebulizer gas flow rate, along with the introduction of internal standards (¹⁸⁵Re and ¹⁰³Rh) for matrix interference correction, the method stability and internal standard recovery rates were significantly improved. Experimental results demonstrated excellent linear calibration curves for all elements (correlation coefficients $R^2 > 0.999$), with method detection limits ranging from 0.01 to 0.5 mg/kg. Spike recovery rates were 75.7%~112%, and relative standard deviations (RSD) ranged from 2.7% to 5.2%. Validation using national certified reference material (GBW07407) confirmed the method's accuracy, with measured values consistently within certified quality control ranges. This sensitive and reproducible method provides reliable technical support for soil environmental monitoring and pollution risk assessment, particularly suitable for high-throughput simultaneous detection of multiple elements in large-scale soil samples.

Keywords: Microwave Digestion; Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS); Four-Acid Digestion; Heavy Metals

土壤作为人类社会赖以生存的基础性资源, 不仅承载着农业生产和生态系统的稳定, 更与粮食安全、环境健康及可持续发展等密切相关^[1]。近年来, 随着人类大规模的工业化和城镇化的快速推进, 环境介质中土壤重金属的污染问题愈发严峻, 成为威胁人类生存环境与公共健康的重大挑战^[2]。重金属因其生物富集性, 可通过食物链在人体内累积, 引发慢性中毒, 部分重金属甚至具有致癌风险^[3]。我国“十三五”期间虽在重金属污染防控中取得部分成果, 但局部地区土壤重金属污染问题

依然突出^[4]。为此，国务院于 2022 年启动第三次全国土壤普查，明确将重金属列为核心检测指标，强调建立高效、精准的检测技术对重金属的污染防控与生态修复具有战略性意义^[5]。

针对重金属污染监测和治理的技术需求，我国自 2016 年《土壤污染防治行动计划》（“土十条”）实施以来，逐步构建了覆盖全国范围的土壤污染详查体系，要求对砷（As）、镉（Cd）、铅（Pb）、铬（Cr）、铜（Cu）、镍（Ni）、锌（Zn）等典型重金属污染物进行系统性监测^[6]。目前，传统检测方法如原子吸收光谱法（AAS）^[7]、原子荧光光谱法（AFS）^[8]及电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）^[9]，虽广泛应用，却受限于灵敏度低、电热板消解前处理复杂、多元素同步检测能力不足及光谱干扰严重等问题^[10]。相比之下，电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）具有超低检出限、宽线性范围、可多元素同步分析及抗干扰能力强等优势，逐渐成为土壤重金属检测的主流技术^[11]。特别是随着环境标准《HJ 1315-2023》发布，电感耦合等离子体质谱法在土壤重金属中的检测应用越来越广泛^[12]。

样品前处理是检测流程的关键环节，直接影响分析结果的准确性。当前主流消解方法包括电热板湿法消解^[13]、石墨消解^[14]及微波消解^[15]等。其中，微波消解技术因高效、快速、适用于高通量样品等特性，被广泛使用在土壤消解过程中。本实验基于微波消解体系（硝酸-盐酸-氢氟酸-高氯酸混合酸体系），结合 ICP-MS 内标法（以铷、铯为内标）及碰撞反应池（KED 模式）技术，建立了一种高效、稳定、可批量化的多元素同步检测方法^[16]。该方法通过优化检测条件、降低基质干扰与质谱干扰，显著提升了检测精度与重复性，为大规模土壤污染监测、普查与治理提供了可靠的技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 仪器设备和试剂

NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪（美国珀金埃尔默公司）；MARS 6 微波消解仪及其配套消解罐和赶酸仪（美国 CEM 公司）；WGII-230BE 型电热鼓风干燥箱（天津拓至明实验仪器设备有限公司）；尼龙筛（孔径为 0.15 mm，100 目）；AG285 电子分析天平（瑞士梅特勒-托利多公司），主要仪器设备见图 1。

硝酸（优级纯）、盐酸（优级纯）、氢氟酸（优级纯）、高氯酸（优级纯）均购自国药集团化学试剂有限公司；12 种金属标准混合溶液（CL-CAL-2，100 mg/L）购自上海安谱实验科技股份有限公司；混合内标溶液（¹⁸⁵Re、¹⁰³Rh，10 mg/L）和调谐液（含 Be、Ce、Fe、In、Li、Mg、Pb、U，基质为 1% HNO₃）均购自美国珀金埃尔默公司；土壤标准物质 GBW07407（GSS-7）购自上海市环境监测技术装备有限公司。

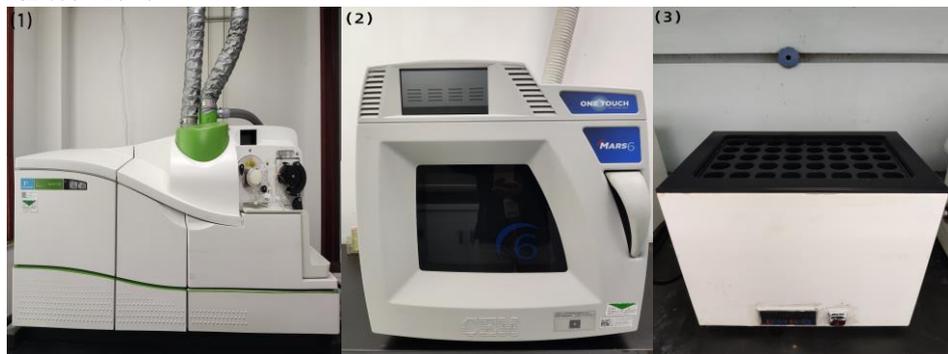


图 1 实验主要仪器设备：(1) NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪；(2) MARS 6 微波消解仪；(3) 赶酸仪
Fig. 1 Main experimental instruments and equipment: (1) NexION 350X inductively coupled plasma mass spectrometer; (2) MARS 6 microwave digestion system; (3) MARS 6 microwave digestion system

1.2 标准溶液的配制

根据 12 中重金属元素在土壤环境中浓度分布水平, 分别移取一定体积的多元素标准溶液于 100 ml 容量瓶中, 用 1% 硝酸溶液稀释定容至刻度, 混匀, 依次制备 C₀~C₉ 10 个浓度点 (含零点) 的标准系列。标准系列浓度见表 1。

表 1 标准系列溶液浓度
Table 1 Concentrations of standard series solutions

元素	C ₀ (μg/L)	C ₁ (μg/L)	C ₂ (μg/L)	C ₃ (μg/L)	C ₄ (μg/L)	C ₅ (μg/L)	C ₆ (μg/L)	C ₇ (μg/L)	C ₈ (μg/L)	C ₉ (μg/L)
镉	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	/	/	/	/
钴	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	/	/
铜	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	/
铬	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	/
锰	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	200
镍	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	/
铅	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	/
锌	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	200
钒	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	200
砷	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0	/	/
钼	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	/	/	/
铈	0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	/	/	/

1.3 样品制备与前处理

1.3.1 样品的采集和制备

实验过程中采集一定数量的土壤实际样品作为验证, 实际样品的采集和保存按照环境标准《HJ/T 166》执行。样品采集后摊开在塑料盘内自然风干, 除去样品中的碎石、叶片等杂物, 将样品进行手工研磨至过孔径 0.15 mm (100 目) 筛后备用。

1.3.2 样品前处理

称取待测土壤样品约 0.1 g (精确至 0.0001 g), 置于微波消解仪自配的聚四氟乙烯密闭消解罐中, 依次加入 6 mL 浓硝酸、3 mL 浓盐酸和 2 mL 氢氟酸。将消解罐安置于消解罐支架内, 放入微波消解仪中, 按照表 2 的微波消解参考程序进行消解, 消解结束后冷却至室温。打开密闭消解罐, 然后将消解罐置于罐体配套的赶酸仪中, 设置赶酸温度 160 °C, 恒温后加入 1 mL 高氯酸于消解罐中赶酸约 60 min 至白烟冒尽, 冷却至室温后, 用去离子水溶解内溶物, 然后将溶液转移至 50 ml 离心管中, 用去离子水定容至 50 ml。测定前使用滤膜过滤测定。微波消解仪参考程序见表 2。

表 2 微波消解参考程序

Table 2 Reference procedure for microwave digestion			
步骤	升温时间 (min)	目标温度 (°C)	保持时间 (min)
1	5	120	2
2	4	150	5
3	5	185	40

2 结果与分析

2.1 测量条件的优化

为确保仪器分析稳定性, 需定期进行锥孔维护: 采样锥与截取锥因使用前后易发生锥孔位置变化, 故每次检测前需采用仪器调谐液进行调谐。通过动态调整矩管三维位置、雾化气流量等参数,

使仪器的灵敏度 ($\text{In } 115 > 40000 \text{ cpsv}$)、背景强度 ($\text{Bkgd} \leq 1$)、氧化物 ($\text{CeO } 156/\text{Ce } 140 \leq 0.025$) 及双电荷离子产率 ($\text{Ce}^{2+} 70/\text{Ce } 140 \leq 0.03$) 满足仪器最佳要求, 优化后的 ICP-MS 工作参数见表 3。

表 3 仪器测量条件的优化

Table 3 Optimization of instrumental measurement conditions

射频功率/W	雾化器流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	等离子体气流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	载气流速/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	采样锥 和截取 锥	采样 深度	内标加 入方式	分析模 式	扫描 方式
1240 W	1.05	18	1.1 L/min	镍锥	6.9 nm	在线 加入	氦气碰 撞反应 池	跳峰

2.2 标准曲线绘制

仪器调谐完毕后, 使用 1% 硝酸溶液对仪器进样系统进行多次清洗, 连接三通, 内标标准使用液通过蠕动泵在线加入, 然后将标准系列从低浓度到高浓度依次通过进样管吸入进样系统进行分析, 以各元素的质量浓度为横坐标, 对应的响应值和内标响应值的比值为纵坐标, 建立标准曲线, 经过仪器自动拟合计算得到线性回归方程和相关系数见表 4。

表 4 标准曲线的相关系数和回归方程

Table 4 Correlation coefficient and regression equation of the calibration curve

元素	相关系数 R^2	线性回归方程
砷	0.9999	$y=0.001x$
镉	0.9999	$y=0.001x$
锰	0.9999	$y=0.004x$
锌	0.9999	$y=0.001x$
铜	0.9999	$y=0.007x$
铬	0.9999	$y=0.005x$
钒	0.9999	$y=0.005x$
铈	0.9999	$y=0.004x$
铅	0.9998	$y=0.008x$
镍	0.9999	$y=0.003x$
钼	0.9999	$y=0.004x$
钴	0.9999	$y=0.012x$

2.3 方法检出限

根据环境标准《HJ 168-2020》, 按照以上样品分析步骤, 重复 11 次空白试验, 然后将各测定结果换算为样品中的浓度, 计算各元素 11 次平行测定值的标准偏差, 根据计算方法检出限公式:

$$MDL = t_{(n-1, 0.99)} \times S \quad (n: \text{测定次数}, t: \text{自由度为 } n-1, \text{置信度为 } 99\% \text{ 时的 } t \text{ 值分布值}, S: \text{标准偏差}),$$

计算出各元素的方法检出限, 具体见表 5。与《HJ 1315-2023》比较发现, 本实验室测定 12 种元素的检出限均低于环境标准 HJ 803-2016 中相应元素的检出限, 说明本实验方法完全满足实际样品检测对检出限的要求。

表 5 实验室方法检出限

Table 5 Detection limit of the laboratory method

元素	检出限 (mg/kg)		结论
	实验室检出限	HJ 1315-2023 方法检出限	
砷	0.03	0.2	满足
镉	0.01	0.03	满足
锰	0.1	2	满足
锌	0.5	5	满足
铜	0.2	0.7	满足
铬	0.1	2	满足

续表 5 实验室方法检出限
Continued Table 5 Detection limit of the laboratory method

元素	检出限 (mg/kg)		结论
	实验室检出限	HJ 1315-2023 方法检出限	
钒	0.1	0.4	满足
铈	0.1	0.3	满足
铅	0.1	1	满足
镍	0.2	2	满足
钼	0.01	0.1	满足
钴	0.01	0.06	满足

2.4 方法精密度实验

选取实验室采集的实际土壤样品, 根据土壤样品中各元素浓度水平不同, 选择高、低两个浓度的样品探究方法精密度实验, 依次对高、低浓度的土壤样品每个重复测定 6 次, 测定结果显示: 12 种元素中, 土壤样品的相对标准偏差范围为 2.7%~5.2%, 方法精密度结果良好, 满足土壤样品对精密度的检测技术要求, 结果见表 6。

表 6 土壤样品的精密度
Table 6 Precision of soil samples

元素	测定值 (mg/kg)							标准偏差 (SD)	相对标准偏差 RSD(%)
	1	2	3	4	5	6	平均值		
砷	7.34	7.35	6.75	6.76	7.08	7.29	7.09	0.28	4.0
	21.9	21.2	19.9	20.0	21.6	21.2	21.0	0.83	4.0
镉	0.500	0.500	0.469	0.478	0.496	0.499	0.490	0.01	2.8
	2.74	2.74	2.59	2.56	2.61	2.66	2.65	0.08	2.9
锰	173	176	164	164	165	170	169	5.1	3.0
	398	372	343	358	384	369	371	19.3	5.2
锌	16.8	16.7	15.6	15.7	16.1	17.0	16.3	0.58	3.5
	44.2	43.5	40.2	41.1	42.8	42.6	42.4	1.50	3.6
铜	21.7	21	19.3	20.1	20.9	20.6	20.6	0.82	4.0
	63.7	64.3	60.6	60.1	62.1	64.2	62.5	1.85	3.0
铬	33.3	34.2	31.7	31.6	32	33.1	32.7	1.04	3.2
	105	100	91.3	95.9	103	101	99.4	5.00	5.0
钒	67.8	68.1	62.4	61.8	64.2	65.4	65.0	2.65	4.1
	147	140	132	134	143	143	140	5.78	4.1
铈	2.54	2.53	2.36	2.36	2.43	2.47	2.45	0.08	3.2
	8.05	7.78	7.37	7.31	8.13	8.02	7.78	0.36	4.6
铅	11.1	11	10.3	10.2	10.4	10.6	10.6	0.36	3.3
	43.6	42.6	40.2	41	44.4	44.4	42.7	1.77	4.2
镍	20.4	19.7	18.0	18.9	19.9	19.1	19.3	0.85	4.4
	64.8	66.1	61.6	61.3	63.4	64.5	63.6	1.89	3.0
钼	2.13	2.07	1.94	1.98	2.07	2.04	2.04	0.069	3.4
	4.27	4.37	4.03	4.09	4.10	4.32	4.20	0.139	3.3
钴	10.4	10.1	9.14	9.51	10	9.68	9.81	0.45	4.6
	21.0	21.6	20.1	20.2	20.6	21.1	20.7	0.56	2.7

2.5 方法正确度实验

根据环境标准《HJ168-2020》的要求, 选取国家有证标准物质 GSS-7 对方法的正确度进行验证, 按照绘制校准曲线相同的仪器条件重复测定 6 次, 进行准确度验证, 结果显示, 所有标准物质浓度均在质控范围内, 测定结果见表 7。

表7 标准物质正确度实验

Table7 Trueness evaluation experiment using certified reference materials (CRMs)

元素	测定值 (mg/kg)							标准值范围 mg/kg	相对 误差 RE (%)	是否合格
	1	2	3	4	5	6	平均值			
砷	5.67	5.68	5.73	5.73	5.66	5.71	5.70	4.8±1.3	18.8	是
镉	0.086	0.094	0.092	0.087	0.088	0.095	0.090	0.08±0.02	12.5	是
锰	1691	1706	1689	1713	1697	1716	1702	1780±113	-4.38	是
锌	133	134	133	134	131	134	133	142±11	-6.34	是
铜	102	103	102	104	101	103	102	97±6	5.15	是
铬	423	434	408	417	406	417	417	410±23	1.71	是
钒	243	251	242	242	239	244	243	245±21	-0.82	是
锑	0.388	0.399	0.393	0.391	0.395	0.398	0.394	0.42±0.09	-6.19	是
铅	12.1	11.9	12.3	12.5	12.4	12.6	12.3	14±3	-12.1	是
镍	282	283	275	285	276	282	280	276±15	1.45	是
钼	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.9±0.3	2.76	是
钴	98.2	100	95.1	96.2	94.5	97.2	96.9	97±6	-0.10	是

2.6 实际样品的测定

在实验室采集的样品中随机选取了一个土壤样品进行检测，并测定样品的加标回收率，按照绘制校准曲线的条件依次测定，结果显示，土壤样品加标回收率在 75.7%~112% 之间，符合环境标准对加标样品回收率（70%~125%）的质控要求，可应用于实际样品的检测。测定结果见表 8。

表8 土壤样品的加标回收率实验

Table 8 Spike recovery experiment for soil samples

元素	原样浓度 mg/kg	加标样品测定值 (mg/kg)							加标浓度 mg/kg	加标回收率 (%)
		1	2	3	4	5	6	平均值		
砷	4.76	9.14	8.78	9.26	9.72	8.68	8.92	9.08	5.0	86.4
镉	0.71	2.96	2.93	2.99	3.14	2.88	2.9	2.97	2.5	90.4
锰	208	364	357	372	379	355	362	365	200	78.4
锌	50.4	66.9	64.9	68	70	63.6	65.6	66.5	20	80.5
铜	21.3	44.4	42.8	44.2	46.2	42	42.6	43.7	20	112
铬	44.0	143	144	149	152	142	140	145	100	101
钒	66.0	217	214	221	232	212	208	217	200	75.7
锑	0.83	3.25	3.13	3.23	3.43	3.09	3.1	3.21	2.5	95.2
铅	31.3	56.1	54.8	57.3	60.1	54.0	54.7	56.2	25	99.5
镍	20.9	43.7	43.3	43.9	45.6	41.8	42.0	43.4	25	89.9
钼	1.73	4.14	4.09	4.28	4.42	3.97	4.09	4.17	2.5	97.6
钴	12.4	36.4	36.3	36.5	38.5	35.1	35.0	36.3	25	95.6

3 讨论

3.1 前处理流程与四酸体系的构建

相较于环境标准《HJ1315-2023》的前处理流程，本实验在样品前处理过程中采用直接加入硝酸-盐酸-氢氟酸组合体系进入微波消解系统，采用逆王水和氢氟酸的体系在微波消解仪高压高温条件下，可以加速破坏土壤样品的晶格使得消解程度更加完全，大大提高了分析结果的准确性^[17]。随后在赶酸流程中加入高氯酸可以提升消解体系的氧化能力，从而进一步消解残余样品，并且高氯酸在高温赶酸阶段可挥发去除残留的盐酸、氢氟酸等介质，减少后续检测中酸基质对仪器的干扰^[18]。

3.2 内标元素的选择与基体干扰的校正

在实际样品的检测分析过程中,一般使用内标法来监测和校正仪器信号的漂移,使用碰撞反应池技术来校正基体效应和质谱的干扰。在内标元素的选择原则上,一般遵循的是该样品中不含该元素或者浓度极低可以忽略,且不会对待测元素产生质谱干扰等因素^[19],本实验选择土壤介质中含量极低的铑和铯作为内标元素,内标回收率稳定,均在质控范围内(内标回收率在70%~130%之间),可有效监控仪器的漂移和基质干扰情况。另外本实验通过碰撞反应池技术和干扰校正方程,大大降低多原子离子干扰和质谱干扰,提高了检测数据的准确性。

4 结论

(1) 本实验采用四酸消解体系结合电感耦合等离子体质谱技术,实现了土壤样品中12种重金属元素的同时测定。通过优化仪器参数和校正基体干扰,大大提高了方法的准确性和可靠性。

(2) 检测结果显示:各元素校准曲线相关系数均大于0.999,方法检出限范围为0.01~0.5 mg/kg,相对标准偏差(RSD)为2.7%~5.2%,实际样品加标回收率为75.7%~112%,均满足环境标准HJ1315-2023的方法要求。

(3) 本实验使用国家一级土壤成分分析标准物质(GBW07407)验证方法正确度,测定值均在标准值质控范围内,方法重现性好、灵敏度高,可用于各类环境样品中多元素重金属的大批量土壤样品快速检测。

参考文献

- [1] 赵彬,王亮,魏雨泉,等.我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望[J].环境科学研究,2024,37(05):1092-1103
- [2] 任超,杜倩倩,夏炎,等.典型矿区农用地土壤重金属污染评价分区探讨[J].环境污染与防治,2021,43(12):1562-1567+1595.
- [3] 夏祥乐,蔡玉龙.环境介质中重金属污染物的毒性测试研究[J].世界有色金属,2019,(16):205+207.
- [4] 刘春红,张亮,贾学桦,等.我国土壤重金属污染环境风险评价方法及防治措施探讨[J].环境影响评价,2024,46(06):1-5+14.
- [5] 生态环境部公布《关于进一步加强重金属污染防控的意见(征求意见稿)》[J].资源再生,2021,(11):3.
- [6] 肖立青,孙云超,邓述培,等.电感耦合等离子体质谱法测定《全国土壤污染状况详查》样品中重金属[J].世界有色金属,2018,(17):190-191.
- [7] 靳玮.原子吸收法在土壤重金属检测中的应用[J].化工管理,2024,(02):29-31.
- [8] 郭启耀.原子荧光光谱法在土壤重金属测定中的应用[J].中国资源综合利用,2024,42(09):164-166.
- [9] 张珏.微波高压消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定城市污泥重金属含量的不确定度评定[J].实验室检测,2024,2(03):38-42.
- [10] 何佼,杨锐,邓伟,等.土壤重金属检测前处理过程优化研究[J].四川环境,2023,42(04):1-6.
- [11] 王亚宁,田悦鸣,陈靖,等.电感耦合等离子体串联质谱技术测定金属铬中痕量元素[J].中国无机分析化学,2025,15(03):389-397.
- [12] 闫哲,龚华,曾祥程.电感耦合等离子体串联质谱测定土壤中21种元素[J].环境化学,2020,39(05):1442-1444.
- [13] 范俊楠,张钰,李国坡,等.基于不同前处理方式ICP-MS法测定土壤中22种金属元素[J].分析科学学报,2024,40(04):454-460.
- [14] 杨开放,董铮.全自动石墨消解-电感耦合等离子体质谱法测定农用地土壤中7种金属元素[J].分析测试技术与仪器,2024,30(05):343-351.
- [15] 侯博,邓晓明,范艳,等.三酸微波消解-硝酸提取-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中16种金属元素的含量[J].理化检验-化学分册,2023,59(12):1413-1419.
- [16] 申磊,侯晓燕,王琬,等.微波消解-电感耦合等离子体质谱仪测定土壤中17种金属元素[J].微量元素与健康研究,2025,42(01):54-57.

- [17] 王倩, 直俊强, 石奥, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 法同时测定土壤中 11 种金属元素[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(01): 7-11.
- [18] 王晶, 黄伟雄, 梁旭霞, 等. 土壤和海洋沉积物中 16 种稀土元素电感耦合等离子体-质谱测定的酸消解体系选择与消除钪元素背景干扰研究[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33 (05): 448-455.
- [19] 罗策, 雷小燕, 黄永红, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定铅及铅合金中镉含量的质谱干扰分析[J]. 分析科学学报, 2016, 32(04): 515-519.

基金项目: 上海市环境科学研究院创新基金 (CX2021180327)。

^{1,*} 第 1 作者简介: 夏兵 (1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为环境污染物监测和分析。E-mail:saesxiab@163.com。