

电感耦合等离子体质谱法在土壤环境监测中的应用及进展

加那尔别克·西里甫汗¹ 张霖琳^{2*} 滕恩江² 梁 宵²

(1. 新疆维吾尔自治区环境监测总站, 乌鲁木齐, 830011; 2. 中国环境监测总站, 北京, 100012)

摘 要 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)作为高灵敏度的分析仪器,已被许多国家应用于环境监测中。本文综述了近年来电感耦合等离子体质谱在土壤样品分析测试中的应用,重点比较了土壤样品前处理中不同的消解体系和消解方式,介绍了激光熔蚀法、氢化物发生法和碰撞反应池技术等土壤环境监测中的新方法,以及ICP-MS在土壤环境监测中用于稀土元素和铂族元素的测定、同位素比值分析、形态分析等新进展。

关键词 ICP-MS, 土壤, 元素。

我国“六五”期间对十三个省、市、自治区农业土壤进行了背景值调查,主要采用分光光度法测定土壤中9种元素的含量。“七五”期间,“全国土壤环境背景值调查研究”^[1]对全国主要土类4095个典型剖面12种元素、近900个主剖面48种元素进行了调查分析,样品主要采用酸碱全量分解方法和固体直接测量的方法,例如 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 分解,原子吸收、原子荧光、等离子体发射光谱和分光光度法测定; $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{O}_2$ 熔融法,电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定稀土等元素;固体粉样采用仪器中子活化分析、X射线荧光光谱分析、硼的发射光谱分析等^[2]。“十一五”期间原国家环境保护总局下发了《关于开展全国土壤污染状况调查的通知》(环发[2006]116号),并制定了《全国土壤污染状况调查分析测试方法技术规范》,全量分解、酸浸取等不同的前处理方法消解土壤样品,火焰原子吸收光谱法、石墨炉原子吸收光谱法等测定金属元素及其化合物^[3]。

电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)是高灵敏度的分析仪器,已被许多发达国家应用于环境监测中,它能够快速检测少量样品中的多种元素,具有检出限低、干扰少、线性范围宽、灵敏度高、同时测定几十种元素、既可进行同位素比值测定又可进行同位素稀释分析等优点。目前我国土壤分析标准方法中尚无ICP-MS的方法,各级监测站多参照美国EPA的方法。EPA200.8^[4]隶属于美国EPA《水和废水化学分析方法》,适用于地下水、地表水和饮用水中可溶性元素的测定,及废水、污泥和土壤等介质中可回收元素总量的测定。EPA6020^[5]隶属于美国EPA《固体废弃物试验分析评价手册》(SW-846)系列,用ICP-MS测定多种介质中60余种元素,该法结合EPA3000系列样品消解制定了一套全面的QA/QC措施、方法校准、标准化措施和操作步骤制定原则,是目前环境方面使用ICP-MS进行土壤元素分析最主要的参考方法。在我国建立高效、快速分析土壤中重金属的方法,对土壤污染现状调查、综合治理土壤污染以及制定土壤环境质量标准等均具有重要意义^[6-7]。

1 ICP-MS测定土壤中的元素

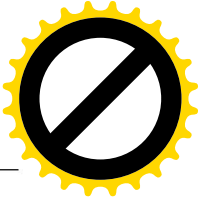
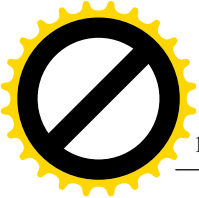
1.1 ICP-MS的特点

1983年第一台电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)商品化之后,该技术发展十分迅速,目前已成为强有力的元素分析手段,表1比较了无机分析中几种常用仪器的性能指标。

目前ICP-MS在土壤环境监测领域中的应用得到不断增强^[9],在土壤样品分析上具有以下优点^[10]: (1)灵敏度高,检出限低。痕量分析检测下限可以达到 10^{-12} ; (2)分析过程简单快速。一个样品的仪器检测时间只需3 min左右,对批量样品可以迅速提供测定结果; (3)线性动态范围宽,适宜多元素同时分析。各元素一般在 $0\text{--}100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内均可测定,有些元素在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}\text{--mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围曲线的相关系数都能达到0.999以上; (4)所需样品量少。进样量为 $50\text{--}100\text{ }\mu\text{L}$; (5)可分析同位素。可准确测定加入富集同位素试剂后样品中的同位素比值,进而可用同位素稀释法快速地计算出样品中待测元素的含

2011年1月4日收稿。

* 通讯联系人, Tel:13810274151, E-mail: zhanglinlin921@sina.com



量^[11]。同位素丰度的指纹技术在土壤重金属的迁移转化、环境行为和来源解析研究方面发挥了重要的作用。

表 1 原子吸收光谱、电感耦合等离子体发射光谱、电感耦合等离子体质谱性能比较^[8]

Table 1 Comparison of AAS, ICP-AES and ICP-MS				
指标	FL-AAS	GF-AAS	ICP-AES	ICP-MS
技术	旧	旧	新	最新
可分析元素种类	较少	较少	较多	几乎所有元素
灵敏度	低	高	低	最高
检测限	ppb—ppm	ppt—ppb	ppb—ppm	ppt—ppb
同位素分析能力	无	无	无	有
线性范围(数量级)	2—3	2—3	4—6	8—9
样品干扰程度	很大	较小	大	极小
分析速度	快	慢	快	快
可同时分析的元素	单元素	单元素	多元素	多元素

1.2 ICP-MS 干扰及校正

ICP-MS 分析干扰主要有质谱干扰和非质谱干扰^[10], 质谱干扰主要来自同质异位素、双电荷离子和多原子离子等谱线重叠干扰, 多原子离子包括双原子离子、氧化物离子、氢氧化物离子等。非质谱干扰包括基体效应和接口效应。基体效应是由于高浓度的基体元素在等离子体火焰中的电离, 增强或抑制了被测元素的电离, 从而使不同元素的灵敏度产生不同程度的影响。接口效应是长时间喷入高盐溶液使采样锥堵塞, 最后导致灵敏度下降。

消除 ICP-MS 干扰的方法主要包括: (1) 仪器分析参数的优化, 每次使用前用调谐液对仪器进行校正, 保证灵敏度、双电荷、氧化物和质量轴均达到设定要求; (2) 样品稀释后分析, 降低基体元素的浓度, 即把样品稀释到基体元素的总浓度低于产生干扰的界限, 从而抑制基体效应; (3) 内标校正, 选择和被测分析物的质量数和电离能相接近的物质作为内标^[12]; (4) 标准加入法用于补偿基体效应; (5) 同位素稀释法测定, 可得到很好的准确度和精密度; (6) 化学分离技术, 从基体中分离出被测物以消除基体效应影响; (7) 流动注射技术也可减少基体效应^[13]。

1.3 土壤样品前处理

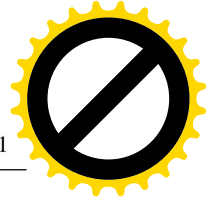
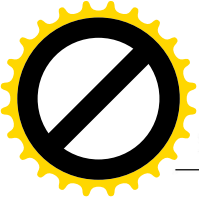
我国土壤类型繁多, 成土母质差异很大, 根据土壤环境监测分析目的不同, 需要选择不同的消解方式来处理样品。全分解方式可以更好地了解土壤中元素含量水平及丰缺供应状况, 适用于区域背景值调查、环境质量现状调查等研究; 酸浸提适用于土壤污染事故调查分析、污染土地处理的动态观察等; 在农业生产和地方病因等研究中, 土壤元素全量的测定可以提供储备情况, 但还需要结合测定其可直接供农作物利用的有效态。因此应用 ICP-MS 进行实际样品测定时, 样品的前处理过程是十分重要的环节, 它不仅决定了分析测定的结果, 还会影响工作的有效性、科学性和实用性。

1.3.1 土壤样品的消解体系

土壤样品的消解主要有全分解、酸浸提和形态分析等前处理方法。

全分解包括酸溶法和碱熔法。酸溶法是最为常用的方法, 常用的试剂有 HF、HCl、HNO₃、H₂SO₄、H₃PO₄ 和 HClO₄ 等, 在 ICP-MS 测定中 HCl、H₂SO₄ 和 H₃PO₄ 会带来多原子离子干扰, H₂SO₄ 的粘稠性还会影响 ICP-MS 的雾化效率, 应尽量避免使用。HNO₃ 被认为是 ICP-MS 分析最好的酸介质, 在等离子中所夹带的空气中已经有了组成 HNO₃ 的元素, 所以 HNO₃ 所导致的多原子离子基体效应并不会显著增加, 另外 HNO₃ 是可获得极纯形式的少数商品酸之一。含有机物较高的试样, 在酸分解前应先进行焙烧或加入 H₂O₂^[14] 除去有机质。通过实验结果的比较, 认为 HF-HNO₃-HClO₄ 的消解体系最适于 ICP-MS 分析测定。需要注意的是 HF 易腐蚀 ICP-MS 雾化器和炬管等石英部件, 用 HClO₄ 赶 HF 时一定要加热赶尽。碱熔法常用的体系有 Na₂O₂-NaOH、Na₂O₂-Na₂CO₃、KHSO₄-K₂S₂O₇ 等, 该方法试剂用量较大, 杂质带来很高的空白, 碱金属元素还可能产生严重的多原子离子干扰, 因此碱熔法在 ICP-MS 分析中很少使用。

酸浸提方法主要有 HNO₃、HCl-HNO₃、HCl-H₂SO₄-HClO₄ 溶浸法等, 但是对于 ICP-MS 测定一般不选



用 HCl 和 H_2SO_4 . 有机物含量高的样品需要加入 HClO_4 或 H_2O_2 使其完全氧化分解, 否则容易影响 ICP-MS 的样品传输和雾化效率^[15], 加入 H_2O_2 还能减少 Hg 及其它能形成氢化物的元素如 As、Se、Sb、Bi、Te 损失. 目前较为适用的是参照美国 EPA3050B 的 HNO_3 - H_2O_2 体系. Cd、Cu、Mn、Zn 比较容易溶出, 溶出比均在 80% 以上, 其次是 Ni, 而 Pb、Cr 包藏在晶格中且晶格非常稳定, 溶出比仅为全量的 53%—67%^[16]. Sb 在沸腾的盐酸中易挥发, 分解样品中的 As 如果有卤化物的存在, 加热时 As^{3+} 易挥发损失 (AsCl_3 沸点为 130.2 °C), 因此最好使 As 保持在五价状态. Pb^{2+} 会与 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} 、 SO_4^{2-} 产生共沉淀^[17].

有效态微量元素的测定在农业化学方面应用较为广泛, 提取剂有柠檬酸、醋酸、稀无机酸等, 也有用 DTPA、草酸-草酸铵等溶液提取的报道.

1.3.2 土壤样品的消解方式

目前多采用电热板加热或者高压罐密闭消解, 一项对土壤中 49 种矿物元素测定的研究结果表明^[18], 电热板消解-ICP-MS 法对 Be 等 29 种元素的分析结果准确可靠, 密闭消解罐消解-ICP-MS 法进行 Sc 等 20 种元素的分析结果准确可靠. 有研究比较不同消解方法 ICP-MS 测定土壤中的重金属^[19], 结果认为电热板消解土壤样品耗时长且重现性较差, 一次处理样品量少、用时长, 赶酸容易造成易挥发组分的损失; 而高压罐消解有一定危险性, 需要人工调节消解时间和温度, 产生酸雾对人体伤害大. 微波消解技术^[20]是在传统湿法消解的基础上新发展起来的现代湿法消解技术, 具有以下优点: (1) 用于样品消解的试剂用量小, 一般在 3—8 mL; (2) 消解速度快, 样品消解过程一般在几分钟到十几分钟之间; (3) 适用范围广, 可用于多类样品的分解; (4) 容器密闭, 能防止消解过程中外源性污染和有效降低试剂空白; (5) 可防止易挥发性元素的挥发损失, 提高分析结果的准确性; (6) 易于实现自动化控制.

文献 [21] 比较了烘箱加热、王水回流和微波消解几种消解方法对测定结果的影响, 认为烘箱加热受热从外到内温度和压力不均衡, 导致样品溶解不完全. 王水回流样品砷、镉等容易损失, 样品定容后酸度很大, 样品空白中有大量的氯, 在 ICP 中形成的 ArCl 分子离子会对 As 的测定造成干扰, 也对部分离子产生谱干扰. 有研究表明^[22], 赶酸至消解罐内剩余样品少于 0.15 mL, 可认为对仪器危害大大减少. 美国 EPA3052 的方法为硅质环境样品的微波全消解方法^[23], 方法中建议的消解程序大致为 0.5 g 干样加 1.0 mL HCl、9.0 mL HNO_3 和 3.0 mL HF, 微波消解约 5.5 min, 由室温升至 (180 ± 5) °C, 保持 9.5 min, 冷却后转移至聚四氟乙烯烧杯中, 加 0.5 mL HClO_4 , 中温 (≤ 200 °C) 蒸干 (或近干), 加一定量稀 HNO_3 和 0.1—0.2 mL H_2O_2 , 加热溶解残渣, 冷却定容. 在具体应用时, 样品量和酸的使用量可根据实际仪器设备情况进行调整.

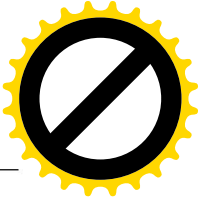
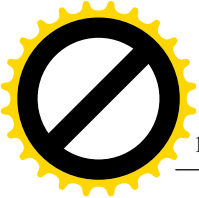
2 土壤环境监测中的新方法

2.1 激光熔蚀法 (LA)

激光熔蚀是在固体样品吸收能量大于其熔蚀阈值的脉冲激光时, 在其表面上发生的自发刻蚀. 由于熔蚀量随样品性能的变化而变化, 使得 LA-ICP-MS 分析过程中难以找到匹配所有待测元素的基体标准. 虽然在一定程度下这种变化可以通过将同时存在于标准和样品中的元素作为内标来校正, 但这一措施对于不具有代表性的样品来说是不行的, Hoffmann^[24] 等提出采用 LA-ICP-TOFMS 可以解决. Lee Yiling 等^[25] 利用 LA-ICP-MS 进行土壤中痕量元素的测定, 结果表明此方法是粉末状样品元素分析的有效方法.

2.2 氢化物发生法 (HG)

氢化物发生-ICP-MS 是一种重要的元素分析技术, 具有以下特点^[26]: (1) 氢化物发生使待测元素以气体形式从基体中分离出来, 克服了基体干扰; (2) 在测定元素形成氢化物的同时, 样品得到浓缩, 大大提高了灵敏度, 降低了检出限; (3) 以氢化物的形式导入 ICP 中, 样品引入效率可达 100%; (4) 可以进行形态分析. Hosick T J 等^[27] 采用连续氢化物发生-ICP-MS 进行土壤中锡元素形态的检测, 土壤样品经过 KOH 熔融, 结果表明该方法是土壤样品锡元素分析的一种有效方法. 应用于氢化物发生的元素目前主要集中于 8 种, 即 Ge、As、Se、Sn、Sb、Te、Pb 和 Bi, 它们在强还原剂作用下容易生成不稳定的共价氢化物. 多采用 NaBH_4 作还原剂, 使检测的重现性大大提高, 反应容易控制并可实现自动化. 国外对氢化物发生法与电感耦合等离子体质谱联用的报道, 主要包括水样和生物样品中痕量元素的测定^[28].



2.3 碰撞反应池技术(CRC)

动态碰撞反应池技术是解决 ICP-MS 多原子离子干扰的一个重要突破. 碰撞池技术的原理和运用源于有机质谱分析中混合物结构分析和离子-分子反应的基础研究. 碰撞池技术是在截取锥和质谱仪之间安置一个六极杆或八极杆, 其中填充适当气体, 比如氦气和氩气, 对于反应池技术(四极杆)填充的氢气、氧气、氮气和氦气等, 通过与多原子离子进行碰撞或反应以消除多原子离子. 碰撞反应池技术可以自行地减少基体干扰, 由于碰撞反应池是由多极杆构成, 通常仅由射频驱动, 所以这种多极杆不像传统四极杆, 不能分离质荷比, 只有聚焦离子作用, 使离子与池内气体碰撞或反应.

目前商品化的碰撞/反应池系统主要有以下几种类型: 四极杆动态反应池、六极杆碰撞池、八极杆碰撞/反应池和无多极杆的碰撞反应接口. 除无多极杆的碰撞反应接口外, 碰撞/反应池的结构基本是由桶状的池体构成. 池体内装有多极杆, 池内充入碰撞或反应气, 维持在比周围真空腔内压力稍高的增压状态. 六极杆或八极杆系统不可以动态扫描, 仅作为离子通道, 不同质荷比的离子不加选择地通过, 具有很好的离子聚焦功能, 待测离子损失较少, 干扰离子通过碰撞/反应消除, 能够准确测定复杂基体样品中铂、铑、钯等贵金属元素^[29]. 而四极杆系统具备的动态“带通”扫描功能, 可以选择特定质荷比范围的离子通过, 且反应池产生的副产物离子落在池内四极杆的带通之外, 处于不稳定区域而得到排除, 具有很好的灵活性. 2005 年出现了新颖独特的无多极杆碰撞反应接口, 该系统无多极杆离子引导装置没有透镜和质谱分析器之间设置专门的碰撞/反应池, 而是利用两个锥接口之间的空间作为反应空间, 将氦气或氢气直接注入锥接口区, 在分析物进入离子透镜前抑制干扰, 不同模式之间可以快速切换^[30].

3 ICP-MS 法在土壤环境监测中的应用进展

3.1 稀土元素、铂族元素的测定

王冠等^[31]在敞开体系中, 用 HF、HNO₃ 和 HClO₄ 溶解电感耦合等离子体质谱法同时测定土壤样品中的 15 种稀土元素. 在高分辨等离子体质谱仪上建立了土壤样品中稀土元素含量的 ICP-MS 分析方法, 经土壤国家一级标准物质分析验证, 结果与标准值相符, 测定的 15 种稀土元素的相对标准偏差均小于 10%, 加标回收率为 96.5%—114.7%.

铂族元素具有较高经济价值, 在测定铂族金属时, 使用酸溶法消解容易造成分解不完全, 特别是赋存于硅酸盐或难溶矿物中的时候, 因此有人采用王水-氢氟酸封闭微波消解与碱熔残渣结合来提高回收率^[32]. 由于汽车上安装催化转化装置而引起的 Pt、Pd、Rh 的环境释放使得现在城市大气颗粒物和道路尘土中存在痕量铂族金属, 其中 Pt 是环境中的主要释放铂族元素. 在用 ICP-MS 测量这些元素时应注意质谱干扰问题, 如在 Cu 和 Y 含量高时, Pd 的测量将受到严重影响. 类似干扰可用分离富集或数学校正的方法纠正^[33].

3.2 同位素比值分析

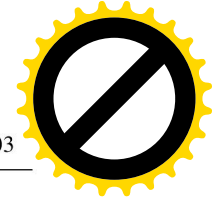
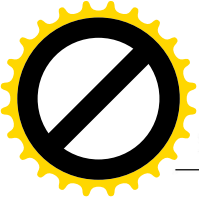
热电离质谱在同位素比值分析中一直占据优势地位, 但近几年来随着 ICP-MS 技术的进步以及其它质量分析器的出现, 如多接收器的分辨磁扇形等离子体质谱仪和飞行时间等离子体质谱仪, 同位素分析精密度大大改善, 和传统使用的热电离源质谱、二次电离质谱等技术相比具有了真正的竞争力. 等离子体的离子化效率比热电离源质谱高一个数量级左右, 许多热电离源无法测定或难以测定的高电离能元素, 都可以通过本法精确测定其同位素组成, 而且 ICP-MS 可以方便地实现与激光系统联用, 直接用于固体样品分析, 由此大大扩展了同位素年代学和地球化学的研究范围. 在环境问题研究中, 铅同位素比值分析可以鉴别土壤中 Pb 的污染来源, 有人利用扇形等离子体质谱仪(ICP-SFMS)对采自一个深度剖面的多个土壤样品中的 Pb 同位素进行测定, 以鉴别人类活动和地球成因造成 Pb 来源的同位素组成差异^[34].

3.3 联用技术用于形态分析

元素存在的化学形态和物理形态的研究逐渐得到人们重视, 与痕量超痕量元素分析相比, 形态分析要求更高. 将色谱的强分离能力和 ICP-MS 的高灵敏度结合, 为形态分析提供了强有力的检测工具.

3.3.1 GC-ICP-MS 联用技术

GC-ICP-MS 联用技术主要用于挥发性金属、金属有机物的测定, 可以完全把待分析的物质不同形



态和基体分开,分离速度高于液相色谱.但 GC-ICP-MS 联用的最大难题是必须使被分析物在从 GC 传递到 ICP-MS 时保持为气态.

3.3.2 HPLC-ICP-MS 联用技术

高效液相色谱由于柱效高、分离速度快和分离效果好,与元素选择性好及灵敏度高的 ICP-MS 联用有着许多潜在的优势.特别是 HPLC 能有效分离性质相近的成分,所以 HPLC-ICP-MS 联用技术主要应用于形态分析^[35],As、Se、Sb、Cd、Sn、Pb、Hg、Te 和 Cr 等元素形态分析是目前生命科学和环境科学中的前沿课题.该技术主要研究方向是采用多级联用技术、降低检出限,提高柱分离效果、克服基体效应和质谱干扰,扩大可测定的元素范围^[36].作为一种分离手段,HPLC 与 ICP-MS 联用对于无机成分检测是有发展前景的,但由于分离体系研究还不深入,限制了高纯物质纯度在线分析中的应用,HPLC-ICP-MS 在形态分析中的应用虽有特长,但进入常规分析尚有相当的距离.

3.3.3 CE-ICP-MS 联用技术

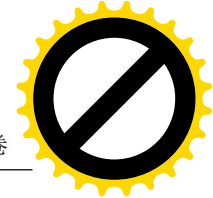
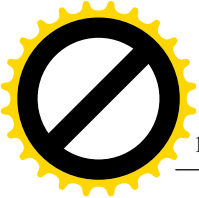
毛细管电泳具有样品用量小、预处理简单、高的塔板数,可快速有效分离复杂混合物,区别不同的氧化还原物质和金属有机化合物等优点.在元素形态分析中,尤其是在生理活性方面起着重要作用. Corinne C 等^[37]分别采用 Babington 雾化器、同心型微型雾化器、微雾型微型雾化器作为 CE 与 ICP-MS 的接口进行土壤样品中 As、Sb、Se 和 Te 的形态分析,结果表明微雾型雾化器效果最好,As 和 Sb 检测限为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Te 为 $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Se 为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

4 结论

由于监测目的不同,土壤环境监测分析方法也多种多样,在测定中由于 ICP-MS 灵敏度高,样品处理过程任何小的误差在测量时会被成倍放大,因此样品的前处理方法是重要环节.酸溶法 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系是较适于 ICP-MS 分析的全分解方式,配合微波消解方法能够更加快速、有效地用于区域背景值调查、环境质量现状调查等研究; $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 酸浸提适用于土壤污染事故调查分析、污染土地处理的动态观察等;形态分析可以采用 ICP-MS 与气相色谱、液相色谱、毛细管电泳等联用技术进行测定.土壤基体复杂,所含元素种类丰富、浓度跨度大,因此,ICP-MS 在环境样品的分析测试中起到十分重要的作用.根据测定需要选择适合的方法来进行分析,是解决实际问题的关键.

参 考 文 献

- [1] 中国环境监测总站主编.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:1-3
- [2] 中国环境监测总站主编.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990:8-9
- [3] HJ/T 166—2004,土壤环境监测技术规范[S]
- [4] EPA Method 200.8, Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma-mass spectrometry [S]. 1994
- [5] EPA SW-846 method 6020 for the analysis of soil and sediments by ICP-MS [S]. 1994, 9
- [6] 季海冰,潘荷芳,李震宇,等.电感耦合等离子体质谱法测定土壤中重金属有效态浓度[J].环境污染与防治,2008,30(12):60-66
- [7] 孟凡乔,史雅娟,吴文良.我国无污染农产品重(类)金属元素土壤环境质量标准的制定与研究进展[J].农业环境保护,2000,19(6):356-359
- [8] Gluodenis T J. ICP-MS the new standard for inorganic analysis[J]. American Laboratory News, 2000, 30(11):24-27
- [9] 刘虎生,邵宏翔.电感耦合等离子体质谱技术与应用[M].北京:化学工业出版社,2005
- [10] K. E. 贾维斯著,尹明,李冰译.电感耦合等离子体质谱手册[M].北京:原子能出版社,1997:85-104
- [11] 陈婷,黄志勇,陈兰,等.电感耦合等离子体质谱同位素稀释法测定菜园土壤中微量镉[J].理化检验-化学分册,2009,45(7):761-764
- [12] K. E. 贾维斯著,尹明,李冰译.电感耦合等离子体质谱手册[M].北京:原子能出版社,1997:113
- [13] 齐文启,孙宗光. ICP-MS 的发展现状及其在环境监测中的应用[J].现代科学仪器,1998,(6):40-45
- [14] EPA Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils [S]. 1996, 12
- [15] 刘虎生,邵宏翔.电感耦合等离子体质谱技术与应用[M].北京:化学工业出版社,2005:109-110
- [16] 中国环境监测总站编著.土壤元素的近代分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1992:64
- [17] 国家环境保护总局、水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法(第四版)(增补版)[M].北京:中国环境科学出版社,2008:379-382
- [18] 田娟娟,杜慧娟,潘秋红,等.电热板消解与密闭罐消解对土壤中 49 种矿质元素 ICP-MS 法检测的影响[J].分析测试学报,2009,28(3):319-325



- [19] 刘传娟,刘凤枝,蔡彦明,等.不同前处理方法 ICP-MS 测定土壤中的重金属 [J]. 分析实验室,2009,28(增刊):91-94
- [20] 张丽萍,刘京.土壤样品中铅和镉的微波消解法研究 [J]. 云南环境科学,2001,20(1):61-62
- [21] 王晓晖,张玉玲,刘娜,等.微波消解-ICP-MS 测定土壤样品中的重金属离子 [J]. 光谱实验室,2008,25(6):1183-1187
- [22] 张晓静,朱凤鹏,胡清源,等.ICP-MS 同时测定土壤中 Cr、Ni、Cu、As、Tl 和 Pb [J]. 中国烟草学报,2009,15(6):18-22
- [23] EPA3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices [S]. 1996, 12
- [24] Hoffmann E, Ludke C, Skole J, et al. New methodical and instrumental developments in laser ablation inductively plasma mass spectroetry [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2002, 57:1535-1545
- [25] Lee Yi-ling, Chang Chao-chiang, Jiang Shiuh-Jen, et al. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry for the determination of trace elements in soil [J]. Spectrochimica Acta Part B, 2003, 58: 523-530
- [26] 肖婕,安晓英,杨光辉.ICP-MS 技术的发展现状及其在环境样品分析中的应用 [J]. 山东化工,2009:24-27
- [27] Hosick T J, Ingamells R L, Machemer S D, et al. Determination of tin in soil by continuous hydride generation and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2002, 456: 263-269
- [28] 刘湘生,刘刚,高志祥,等.氢化物发生-电感耦合等离子体质谱联用技术研究 [J]. 分析化学,2003,31(8):1016-1020
- [29] 冯敏,王英锋,张兰,等.应用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)的八极杆碰撞/反应池(ORS)技术测定地质样品中的铂、铼、钯 [J]. 环境化学,2010,29(3):555-557
- [30] 李冰,胡静宇,赵墨田.碰撞/反应池 ICP-MS 性能及应用进展 [J]. 质谱学报,2010,31(1):1-11
- [31] 王冠,曾英,杜谷,等.土壤样品中稀土元素的高分辨电感耦合等离子质谱分析及其不确定度的评定探讨 [J]. 沉积与特提斯地质, 2009,29(4):100-104
- [32] Jarvis I, Totland M M, Jarvis K E. Determination of the platinum-group elements in geological materials by ICP-MS using microwave digestion alkali fusion and cation-exchange chromatography [J]. Chemical Geology, 1997, 143: 27-42
- [33] 李冰,杨红霞.电感耦合等离子体质谱原理和应用 [M]. 北京:地质出版社,2005:172
- [34] Prohaska T, Walkins M, Latkoczy C, et al. Lead isotope ratio analysis by inductivity coupled plasma sector field mass spectrometry (ICP-SFMS) in soil digests of depth profile [J]. J Anal At Spectrum, 2000, 15: 507-513
- [35] 刘湘生,何小青,陈翥翔.高效液相色谱电感耦合等离子体质谱联用技术 HPLC-ICP-MS 进展 [J]. 现代科学仪器,2003(4):38-42
- [36] Montes-Bayón M, LeDuc D L, Terry N, et al. Selenium speciation in wild type and genetically modified Se accumulating plants with HPLC separation and ICP-MS/ES-MS detection [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2002, 17(8): 872-879
- [37] Corinne C. Optimization of the hyphenation between capillary zone electrophoresis and inductively coupled plasma mass spectrometry for the measurement of As-Sb-Se-and Te-species, applicable to soil extracts [J]. Spectrochimica Acta part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 57(1): 173-187

APPLICATION AND PROGRESS OF INDUCTIVELY COUPLED PLASMA MASS SPECTROMETRY IN SOIL ENVIRONMENTAL MONITORING

JANARBEEK Xiriphan¹ ZHANG Linlin² TENG Enjiang² LIANG Xiao²

(1. Xinjiang Environmental Monitor Center, Urumqi, 830011, China;

2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing, 100012, China)

ABSTRACT

As an analytical instrument with high sensitivity, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) has been used in environmental monitoring in many developed countries. This paper reviewed recent application of inductively coupled plasma mass spectrometry in the analysis of environmental soil samples, focusing on the digestion system and digestion modes in the pre-treatment of soil samples. New methods of ICP-MS in soil environmental monitoring were introduced, including laser ablation, hydride generation, and collision reaction cell. New developments were reviewed, such as the determination of rare earth elements and platinum group element, isotope ratio analysis, and coupling technique in speciation analysis.

Keywords: ICP-MS, soil, element.