

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)最新应用进展

冯先进¹ 屈太原²

(1 北京矿冶研究总院 2 桂林理工大学)

摘要 本文归纳了2008年以来电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的最新应用进展,并主要阐述了近年来ICP-MS在地质科学、生物与医学、食品安全、农业生产、材料科学、冶金工业、环境分析中的应用。从样品处理,进样技术,内标元素的选择等多方面综述了ICP-MS在不同领域的应用。最后对ICP-MS的发展前景做了展望。

关键词 ICP-MS;联用技术;评述;进展

中图分类号:O657.63 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-1035(2011)01-0046-07

The latest application progress of inductively coupled plasma mass spectrometry

FENG Xianjin¹, QU Taiyuan²

(1 Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China;

2 Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract The latest application progress of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) since 2008 were introduced. Particularly, ICP-MS applications in the areas of geological science, biology/medicine, food safety, agricultural production, materials science, metallurgical industry, and environmental analysis were summarized. Different application areas were reviewed from several aspects including sample treatment, injection technology and choice of internal standard elements, etc. Finally, prospects of ICP-MS development were described.

Keywords ICP-MS; coupled techniques; review; progress

1 前言

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)自上世纪八十年代问世至今,尤其是近十年来多接收-电感耦合等离子体质谱法(MC-ICP-MS)、激光烧蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)等新技术的出现,使得ICP-MS技术得到迅猛的发展。而ICP-MS所具有的高灵敏度、干扰少、超痕量检测限、多元素同时分析等诸多优点,都使得其在当今前沿分析技术中具有无可替代的地位。仅2008年至今国内发表的ICP-MS文献就多达1500余篇。其应用范围更

是涵盖了天文学、地球科学、数理科学和化学、医学、卫生、环境科学、安全科学、工业技术、农业科学、生物科学、历史、地理等诸多领域。

2 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的最新应用

本文介绍了2008年以来电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)在地质科学、生物与医学、食品安全、农业生产、材料科学、冶金工业、环境分析中应用的一些最新进展。

2.1 地质科学

收稿日期:2010-12-17 修回日期:2011-1-10

作者简介:冯先进,男,教授级高工,主要从事电感耦合等离子体质谱方法研究。E-mail: fxi0018@126.com

ICP-MS 自问世后,就被广泛应用到地质样品分析中,时至今日地质科学仍然是 ICP-MS 最重要的应用领域之一,随着地球科学的发展,需要测定的元素越来越多,检测限越来越低。传统的四极杆质谱仪已被 MC-ICP-MS、LA-ICP-MS、LA-MC-ICP-MS 等新技术所取代。侯可军等^[1]用激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)技术对 30~1065 Ma 的系列锆石进行了详细的定年研究。包含离子计数器的多接收系统使得不同质量数的同位素信号可以同时静态接收,进而可以获得高精度的数据,不同质量数同位素信号的同时静态接收使得剥蚀时间缩短,剥蚀深度变浅,相比 LA-ICP-MS 方法,提高了激光剥蚀的空间分辨率。周长勇等^[2]对出露于冈底斯西部地区措勤北部达瓦错东侧的达雄岩体进行了锆石 U-Pb 定年、全岩主量元素、微量元素、Sr-Nd 同位素和锆石 Hf 同位素研究。朱祥坤等^[3]详细报道了在低分辨和高分辨模式下运用 MC-ICP-MS 进行 Fe 同位素比值高精度测试的方法,对 Fe 同位素测定过程中谱峰干扰、基质效应、浓度效应、仪器测试的长期重现性等问题进行了评估,并对两种运行模式的测试结果进行了对比。在 95% 的可信度范围内,所建方法的外部精度优于 0.5‰/amu。刘智敏等^[4]将 193 nm 准分子纳秒激光与四级杆电感耦合等离子体质谱联用,测量了国际参照物玻璃中 Pb 同位素丰度比,结果令人满意。

用 HCl/H₂O₂ 封闭溶样 ZPA₄ 螯合树脂富集 8 种元素,并通过树脂灰化、HCl/H₂O₂ 封闭分解制备成试液,ICP-MS 测定地质样品中超痕量 Au、Pt、Pd、Os、Ir、Ru、Rh 和 Re,能有效地降低空白值,提高了仪器的检测能力^[5]。赵志飞等^[6]用 ICP-MS 和 ICP-AES 测定高钙碳酸盐样品中的铜和镍。通过试验分析了高钙碳酸盐样品中钙对铜、镍测定的影响,并确定其影响因子,提出两套检测高钙碳酸盐样品中铜、镍的方案。采用四硼酸锂熔融玻璃片法制样,213 nm 固体激光器剥蚀系统和电感耦合等离子体质谱仪联用(LA-ICP-MS)快速测量玻璃片中铈钽钪钨等难溶元素含量。可以满足地质样品中铈钽钪钨等微量元素快速分析法要求^[7]。

采用膜去溶进样可以很好地解决测定地质样品时 Zr、Nb、Y 的氧化物和氢氧化物对 Ag 的干扰。再结合少量 N₂ 的引入还可以进一步提高 Ag 的检测灵敏度和降低氧化物和氢氧化物的干扰。徐娟等^[8]采用膜去溶-ICP-MS 分析方法直接测定各种地质样品中的微量 Ag。MC-ICP-MS、LA-ICP-MS、

LA-MC-ICP-MS 等新技术尚属起步阶段,随着仪器的普及和功能的完善,在地球科学领域必然拥有更加广阔的应用前景。

2.2 生物与医学

生物样品中某些无机元素含量很低,所检测的绝对量非常小,因此对仪器的检出限和灵敏度要求极高。ICP-MS 在生物样品的检测方面具有独一无二的优势。张秀武等^[9]利用甲醇,异丙醇,正丁醇,1,4-丁二醇 4 种不同有机溶剂作为碳元素来源,改善实际样品和标准溶液之间的基体匹配,用温控 HNO₃-H₂O₂ 湿法消解,ICP-MS 测定全血中 5 种微量元素的含量。近年来,通过改变溶样技术、利用双内标校正技术、或直接稀释的方法来测定血液中的微量元素^[10-14],都取得了令人满意的结果。谢建滨等^[15]还利用八极杆碰撞池电感耦合等离子体质谱(ORS-ICP-MS)测定尿中 10 种元素,尿样用 5% HNO₃ 稀释 5 倍后,直接同时测定铅、砷、钒、镉等 10 种元素含量。

在人体组织金属元素的分析中,ICP-MS 法发展很快。张丹等^[16]把样品经 HNO₃+H₂O₂ 微波消解法,以锂、铕、铈、铟、铋作为内标物质,直接用 ICP-MS 同时测定头发和指甲中 10 种元素。有人^[17-19]还成功用 ICP-MS 测定了癌症患者癌细胞中微量元素的含量,为医药研究提供了可靠的数据。陈圆圆等^[20]应用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术检测电流损伤皮肤中金属元素。用黄铜、紫铜、铝、铁电极材料以 220 V 交流电电击家兔后肢,ICP-MS 对电流损伤皮肤中金属元素进行检测。结果与对照组比较:黄铜电击组皮肤中的 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 含量升高(P<0.05),紫铜电击组皮肤中的 Cr、Cu、Pb 含量升高(P<0.05),铝电击组皮肤中的 Al、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Pb 含量升高(P<0.05),铁电击组皮肤中的 Cr、Mn、Fe、Ni 含量升高(P<0.05),不同电极材料电击后皮肤中元素种类及含量也存在明显差异。此法可作为检测电流损伤皮肤中金属元素的有效方法,且可应用于触电材料的推断。

微波消解-ICP-MS 法也是近年来医药样品最主要的分析技术^[21-24]。王斌等^[23]用微波消解及 ICP-MS,建立了一种测定二色补血草中 Be, B, Na, Al, Mg, P, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Sr, Mo, Cd, Ba, La, Hg, Pb 和 Th 共 27 种元素的方法。实验采用国家一级标准物质茶叶(GBW-07605)评价了方法的准确性,通过在线加入 Ge, In 和 Bi 三种元素内标液的方法来校正由于基体效

应和信号漂移对测量所造成的影响。方法的回收率为92.4%~107.2%，检出限为0.002~0.081 $\mu\text{g/L}$ 。元素的测定结果表明：二色补血草中含有丰富的Na, K, Ca, Mg和P等常量元素, Fe, Mn, Zn, Cr和Cu等微量元素。

利用松树年轮化学分析结果追踪环境重金属的历史变化, 对污染元素进行源解析, 是一种追踪区域性环境污染的有效生物学途径。龙琼等^[25]采用ICP-MS分析方法, 对中国西南地区攀枝花的松树年轮中5种微量重金属的质量分数进行了测量。

微波消解法处理生物样品, 除了操作简单, 减少了试剂使用量外, 还使得As, Hg, Se等易挥发组分更好的保留在溶液中, 与ICP-MS结合使用, 在近年来得到了越来越广泛的应用。

2.3 食品安全

随着人们生活水平日益提高, 食品安全已经成为人们关注的热点。人体所含有各种元素, 其获得途径主要来源于食物, 食品中积累的重金属可通过食物链进入人体, 给人类健康带来危害。在人们对食品质量安全日益关注的情况下, 对食品中重金属的检测就变得尤为重要。王丙涛等^[26]研究了ICP-MS检测奶粉中17种元素和15种稀土元素的干扰情况。比较了硝酸和硫酸、硝酸和双氧水消解体系对消解效果的影响, 同时探讨了基质中共存元素P对Ti测定的影响。林立等^[27]采用液相色谱(HPLC)和ICP-MS联用测定白酒中砷的形态。王琛等^[28]研究了多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)测定红酒样品中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位素比的分析方法, 并用建立的分离测定方法参加了欧洲参考物质与测量研究所(IRMM)组织的CCQM-P105国际比对, 即红酒中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位素比的分析比对。彭荣飞等^[29]建立ICP-MS直接测定酱油中Pb和As的分析方法。采用微波消解方法消解样品后, 直接进行ICP-MS分析, 并用碰撞池技术消除质谱干扰, 混合内标溶液校正基体干扰和漂移, 黄晓文等^[30]测定了大米中11种元素。张涛等^[31]用色谱与质谱联用法对大米蛋白提取液中含硒蛋白组分及含硒氨基酸组成进行初步分析。

蔬菜、水果的重金属含量也是人们关注的焦点。食品中金属含量的测定, 一般多采用吸光光度法、原子吸收光谱法、离子色谱法及电化学法。近年来, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)由于它自身的优势, 在食品中的应用也越来越广泛^[32-37]。高慧莉等^[32]采用电感耦合等离子体质谱法同时测定蔬菜中重金

属元素。测定结果与原子吸收光谱法测定比较, 满足分析要求。杨振宇等^[37]采用碱性溶液稳定并提取保健品中的六价铬, 在阴离子色谱柱上进行分离, 用ICP-MS对六价铬进行检测。刘华章等^[38]采用碰撞池ICP-MS测定高盐度样品如食盐、调味品和尿液中的Cr、V、As和Se。样品经稀释或消化后用ICP-MS进行分析, 用耐高盐接口(Xi接口)降低非质谱干扰, 用碰撞/反应池技术消除质谱干扰, 对3个标准参考物质的分析结果令人满意。李宁涛等^[39]采用微波消解法处理木制食品接触材料, 优化电感耦合等离子体质谱检测参数, 建立木制食品接触材料中Sb、As、Cd、Cr金属元素的微波消解-电感耦合等离子体质谱的分析方法。高杨等^[40]利用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术研究了海带、羊栖菜、紫菜及浒苔等干海产品中的砷含量及其化学形态。电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)能同时地快速测定多种元素, 具有检出限低、干扰少、精度高、分析速度快等特性, 今后必将在这一领域得到更大的发展。

2.4 农业生产

目前, 发展无公害农产品, 全面提高农产品质量, 已成为现代农业发展的必然选择。而电感耦合等离子体质谱仪以其独特的接口技术将ICP离子源与质谱仪所具有的特点, 用该技术测定无公害农产品及土壤样品, 能得到满意的结果。芮玉奎等^[41]选用北京市场上销售的进口KCl肥料作为实验材料, 全面分析了其中的10种重金属元素含量。还借助ICP-MS/ICP-AES技术对转基因棉花和对照纤维中的微量元素和重金属进行了系统的研究^[42]。陈虹等^[43]采用湿法消解样品, 在硝酸介质中用ICP-MS测定了无公害农产品土壤样中Pb、Cd的含量。尚媛等^[44]采用ICP-MS法对吉林省延边苹果梨主产区土壤稀土元素含量进行测定, 分析了稀土元素分布特征, 并结合苹果梨的品质测试结果, 研究了土壤稀土元素分布及含量特征与苹果梨品质之间的相关关系。汪振立等^[45]用ICP-MS法测定赣南稀土高背景区和稀土低背景区不同地质环境脐橙果园中的岩石、土壤、脐橙植物样中15种稀土元素的含量, 检测脐橙果实有机营养物质总糖、总酸、粗纤维、维生素C、类胡萝卜素、氨基酸等含量, 并对稀土元素在土壤和脐橙植物体内的含量与脐橙有机营养物质含量的相关性进行了研究。ICP-MS在环境、地质行业的应用最为广泛和成熟, 在农业生产中最近才得到应用, 但是相对石墨炉原子吸收方法(GF-

AAS)以及原子荧光法(AFS),ICP-MS分析方法用于分析检测食品中多种重金属元素(As、Cd、Hg、Pb、Cr)具有极低的检出限。伴随着越来越多ICP-MS国家标准的出台,ICP-MS必将逐渐取代GF-AAS及AFS,成为农业生产中重金属元素分析的首选方法。

2.5 材料科学

随着科学的不断发展。对材料中痕量元素杂质的检测要求越来越高。ICP-MS技术历史虽短,但已取得了很大发展,并已在材料分析中发挥重大作用。这方面的研究近年来也大量涌现^[46-52]。叶曦雯等^[47]采用5 mL硝酸、1 mL 30%过氧化氢和1 mL氟硼酸消解体系,在190 °C下消解30 min可使绝大多数塑料样品获得较好的消解效果,选取聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)3种典型空白料基质进行标准添加回收实验,回收率为88%~112%,相对标准偏差(RSD)小于3%。冯流星等^[48]采用同位素稀释电感耦合等离子体质谱法(ID-ICP-MS)测定了聚丙烯塑料中Hg元素的含量。样品处理采用高压密封焖罐酸溶样技术,与传统方法相比具有准确度高、不确定度小、受外界污染及样品损失影响小等优点。周学忠等^[50]建立以高分辨电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS)法测定医用硅胶中14种微量元素的方法。另外,用离子交换树脂和溶剂萃取相结合的分选技术分离涂料中As(III)、As(V)、MMA(甲基丙烯酸)、DMA(二甲基丙烯酸)等4种砷化合物,试液直接用HR-ICP-MS法同时测定^[51]上述4种砷化合物。李娜等^[53]应用ICP-MS同时测定磁制冷材料——钎硅锆系合金中的杂质元素。过去对材料杂质元素的分析采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES),但随着要求检出限的降低以及ICP-MS仪器在我国的普及,ICP-MS逐渐取代ICP-AES成为了材料分析的主要手段。

2.6 冶金工业

为了适应现代高速发展的科学技术,冶金行业高纯金属及其化合物材料的研究,颇受重视。对于化学分析需求越来越高,而ICP-MS与多种分离技术及进样方法相结合,更能适用于痕量超痕量元素分析^[54-61]。宋雪洁等^[55]基于电感耦合等离子体四极杆质谱仪进行Nd₂O₃中稀土杂质测定,着重研究了碰撞反应池技术(CCT)用于基体Nd氧化物和氢氧化物干扰离子的消除。墨淑敏等^[56]建立了用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定高纯ZnS粉

末中Mg、Al、Mn、Ni等11种痕量金属杂质含量的方法。样品溶解后可直接进样分析。方法能够满足纯度在99.99%~99.999%范围的ZnS样品中杂质测定的需要。利用内标法和标准加入法克服基体干扰,动态反应池(DRC)技术消除多原子离子干扰,亢德华等^[57]建立了电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)不分离基体直接同时测定再生锌锭中的Al、Fe、Cu、Cd、Sn、Pb、Sb痕量杂质元素的方法。并利用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)同时测定了转炉渣中的痕量锌和铅杂质元素。韩国军等^[62-63]研究了不经基体分离,膜去溶-ICP-MS法直接测定高纯CeO₂和高纯Eu₂O₃中14种痕量稀土杂质的分析方法。讨论了Eu基体产生的多原子离子对被测元素的质谱干扰。使用膜去溶后,待测元素灵敏度提高3倍左右。于永波等^[64]为解决赤泥对环境污染及其综合利用等问题,利用ICP-MS, XRD, 激光粒度分析和差热分析方法,对山西铝厂赤泥进行了检测。

2.7 环境分析

环境样品基体复杂,被测物浓度含量低,取样时空跨度大。ICP-MS技术显著提高了无机元素分析的灵敏度,所具有的多元素同时测定的能力在环境分析中能够得到充分的发展和施展。粟永阳等^[65]采用气溶胶直接进样ICP-MS在线定量分析技术,对取样钢瓶取得的某环境气溶胶样品进行直接进样快速分析。对²³⁹Pu的检出限为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ Bq/m}^3$;所测样品浓度在 $3.1 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$ 之间,比法规限值低一个数量级以上。陈多宏等^[66]分别在典型电子垃圾拆解区和其参考区采集了大气总悬浮颗粒物(TSP)样品,利用等离子体电感耦合质谱(ICP-MS)检测了13种元素。龙永珍等^[67]在长沙、株洲、湘潭(即长株潭)地区系统采集近地表灰尘样品155件,用ICP-MS法、聚类分析、相关分析、X线衍射法及尼梅罗综合污染指数法等方法对其重金属的含量、空间分布特征、主要污染物来源及污染程度进行研究。吕伟明等^[68]研究并提出了用ICP-MS测定地表水中多个元素的分析方法。谢云欣等^[69]通过试验确定了ICP-MS检测饮用水中Hg含量的方法。检测方法的检出限(DL)、定量限(LOQ)和精密度(RSD)分别达到0.00274 ng/mL、0.0091 ng/mL和6.18%(n=12)。赵志飞等^[70],用电感耦合等离子体质谱法测定湖泊水中痕量溴、碘。彭荣飞等^[71]采用碰撞池ICP-MS测定近海海水中Cr、As、Se、Cd、Cu、Zn、Hg和Pb.,用耐高盐接口和内标法消除

非质谱干扰,用碰撞池技术消除质谱干扰。吴颖娟等^[72]以云浮黄铁矿矿石作原料的某硫酸厂堆渣场土壤剖面为研究对象,应用 ICP-MS 同时测定了污染元素和部分参考元素的含量,快速找出各元素的相关性,用富集因子评价了土壤的污染状态,并指出了污染元素的背景选择问题。电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)是当今多元素测定领域中最先进和准确的分析测试手段之一,具有极低的检出限,响应很高的灵敏度和比较宽的线性范围,特别适合环境样品中极低浓度有害元素的同时测定。

3 展望

随着我国经济和科学技术的发展,ICP-MS 分析仪器正逐渐在我国普及开来,其应用领域越来越广泛。不仅 ICP-MS 仪器单独使用会越来越广泛,而且与其它技术联用技术也正在我国迅速发展。最常用的联用技术有激光熔蚀(LA)-ICP-MS、氢化物发生(HG)-ICP-MS、毛细管电泳(CE)-ICP-MS、高效液相色谱(HPLC)-ICP-MS、气相色谱(GC)-ICP-MS、离子色谱仪(IC)-ICP-MS、流动注射(FI)-电热蒸发(ETV)-ICP-MS、超临界流体色谱(SFC)-ICP-MS。随着科学技术的进步和广大分析工作者应用、研究的深入,ICP-MS 技术必将以其自身独特的优势在未来的分析化学领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 侯可军,李延河,田有荣,等. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质,2009, 28(4):481-492.
- [2] 周长勇,朱弟成,赵志丹,等. 西藏冈底斯带西部达雄岩体的岩石成因:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报,2008, 24(2):348-358.
- [3] 朱祥坤,李志红,赵新苗,等. 铁同位素的 MC-ICP-MS 测定方法与地质标准物质的铁同位素组成[J]. 岩石矿物学杂志,2008, 27(4):263-272.
- [4] 刘智敏,史玉芳,刘勇胜,等. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法测定地质玻璃中铅同位素组成[J]. 分析试验室,2010, 29(4):9-13.
- [5] 胡庆云,张振森,陈抗亭,等. 等离子体质谱法测定地质样品中超痕量贵金属和铼[J]. 贵金属,2007, 28(1):43-47.
- [6] 赵志飞,李丹,李策,等. 高钙碳酸盐地质样品中铜镍的测定[J]. 岩矿测试,2010, 29(2):187-189.
- [7] 张彦辉,郭虹,薛丽丽,等. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)法快速测定地质样品中铋铅铋铅等难溶元素——2009 联合学术交流年会论文集[M]. 北京:中国质谱学会无机、同位素、仪器与教育委员会,2009:55-58.
- [8] 徐娟,胡兆初,刘勇胜,等. 膜去溶-电感耦合等离子质谱测定 21 种国际地质标样中的银[J]. 分析化学,2008, 36(11):1493-1498.
- [9] 张秀武,李永华,杨林生,等. 温控湿法消解 ICP-MS 测定全血中铅镉硒砷汞 5 种微量元素[J]. 光谱学与光谱分析,2010, 30(7):1972-1974.
- [10] 李香云,练鸿振,陈逸,等. ICP-MS 法测定大鼠血清和果蔬发酵液中的微量元素[J]. 光谱学与光谱分析,2008, 28(9):2181-2185.
- [11] 闫赖赖,刘丽萍,牛刚,等. 铅染毒大鼠血液中铅与其他元素含量的相关性研究[J]. 质谱学报,2009, 30(5):295-299.
- [12] 张霖琳,邢小茹,吴国平,等. 微波消解-ICP-MS 测定人体血浆中 30 种痕量元素[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(4):1115-1118.
- [13] 柳洁,曾丽,何碧英,等. 全血中 14 种痕量有毒金属元素的 ICP-MS 测定方法的研究[J]. 现代预防医学,2008, 35(23):4652-4654.
- [14] 闫颖,梁月琴,于水,等. 电感耦合等离子体质谱测定血清钠[J]. 中华检验医学杂志,2009, 32(1):92-96.
- [15] 谢建滨,张慧敏,黎雪慧,等. 尿中 10 种元素碰撞池 ICP-MS 方法快速测定[J]. 中国公共卫生,2008, 24(8):975-976.
- [16] 张丹,邹向宇,徐健,等. 微波消解-ICP-MS 法测定头发和指甲中 10 种元素的方法研究[J]. 上海交通大学学报:医学版,2008, 28(10):1347-1349.
- [17] 张霖琳,马千里,黄云超,等. 微波消解-ICP-MS 法测定肺癌患者肺组织中 33 种元素[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(12):3387-3391.
- [18] 于海林,姜燕,赵亮,等. 卵巢癌细胞中 hCTR1 的表达与细胞对顺铂耐药的相关研究[J]. 肿瘤,2009, 29(10):934-939.
- [19] 杨华娟,胡春宏,李立波. 肝癌组织中微量元素的质谱分析研究[J]. 当代医学,2008, 14(23):11-13.
- [20] 陈圆圆,张建华,马栋,等. 电感耦合等离子体质谱法检测电流损伤皮肤中金属元素[J]. 法医学杂志,2010, 26(1):6-9.
- [21] 孙卫民,薛大方,李红,等. ICP-MS 分析 14 种中药铀、钍、铊含量[J]. 光谱学与光谱分析. 2009, 29(1):256-258.
- [22] 陈辉,Chen H. 微波消解 ICP-MS 测定冬虫夏草中铜、铅、砷和镉的含量[J]. 光谱实验室,2010, 27(1):309-311.
- [23] 王斌,徐银峰,李国强,等. 微波消解/ICP-MS 法测定二色补血草中 27 种元素[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(11):3138-3140.

- [24] 杜慧娟, 田娟娟, 段长青, 等. ICP-MS 法测定赤霞珠葡萄叶片中的 54 种元素[J]. 分析试验室, 2009, 28(z1):339-345.
- [25] 龙琼, 虞先国, 钟红梅, 等. ICP-MS 法测定松树年轮中重金属元素含量[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2009, 36(3):333-336.
- [26] 王丙涛, 林燕奎, 颜治, 等. HPLC-ICP-MS 同时检测 As 和 Se 形态的方法研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2010, 32(2):88-92.
- [27] 林立, 陈光, 陈玉红, 等. 液相色谱-电感耦合等离子体质谱法联用测定白酒中的无机砷[J]. 环境化学, 2008, 27(6):853-855.
- [28] 王琛, 赵永刚, 姜小燕, 等. 红酒中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比测定[J]. 化学分析计量, 2009, 18(6):21-24.
- [29] 彭荣飞, 侯建荣, 黄聪, 等. ICP-MS 直接测定酱油中 Pb 和 As 的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(7):1315-1316.
- [30] 黄晓文, 张念, 黄小龙, 等. 碰撞池 ICP-MS 测定大米中 Ca、Mn、Fe、Cu、Ni、As、Se、Sr、Cd、Ba 和 Hg 的研究[J]. 光谱实验室, 2009, 26(5):1095-1099.
- [31] 张涛, 高愈希, 李柏, 等. 高效液相色谱-等离子体质谱联用方法研究富硒大米中硒的形态[J]. 分析化学, 2008, 36(2):206-210.
- [32] 高慧莉, 陈海英, 陈国娟, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定蔬菜中重金属元素的研究[J]. 农业科技与装备, 2009, (3):112-113.
- [33] 芮玉奎, 张福锁, 王正瑞, 等. ICP-MS/ICP-AES 法快速测定转基因棉花种子中的矿质元素和重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1):509-510.
- [34] 芮玉奎, 申琳, 生吉萍, 等. 冬枣果实中微量元素和重金属含量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8):1928-1930.
- [35] 王玉萍, 庞艳华, 李军, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定调味品中砷的含量[J]. 食品科学, 2008, 29(1):231-233.
- [36] 侯建荣, 贺小平, 彭荣飞, 等. 电感耦合等离子体质谱测定油条中的铝[J]. 中国食品卫生杂志, 2008, 20(2):142-143.
- [37] 杨振宇, 郭德华, 杨克成, 等. 保健食品中的六价铬测定[J]. 质谱学报, 2008, 29(2):92-96.
- [38] 刘华章, 彭荣飞, 侯建荣, 等. ICP-MS 碰撞池技术测定食盐、调味品和尿液中的 Cr、V、As 和 Se[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(4):577-579.
- [39] 李宁涛, 卢立新, 王利兵, 等. 微波消解-电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)测定木制食品接触材料中有害重金属[J]. 包装工程, 2008, 29(9):50-53.
- [40] 高杨, 曹焯, 余晶晶, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术测定干海产品中砷化学形态[J]. 分析化学, 2009, 37(12):1738-1742.
- [41] 芮玉奎, 申建波, 张福锁, 等. 应用 ICP-MS 测定 KCl 肥料中重金属元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10):2428-2430.
- [42] 芮玉奎, 张福锁, 王正瑞, 等. ICP-MS/ICP-AES 法快速测定转基因棉花种子中的矿质元素和重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1):937-939.
- [43] 陈虹, 张素珍, 吴小均. ICP-MS 测定无公害农产品土壤样中的铅、镉[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23):12509-12513.
- [44] 尚媛, 王冬艳, 李月芬, 等. 土壤稀土元素特征与苹果梨品质相关关系分析[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(1):68-71.
- [45] 汪振立, 邓通德, 胡正义, 等. 脐橙品质与自然土壤中稀土元素相关性分析[J]. 土壤, 2010, 42(3):459-466.
- [46] 刘欣丽, 段大成, 韩熠, 等. 悬浮进样-电感耦合等离子体质谱水溶液校正法测定高纯石墨中的超痕量硼[J]. 分析化学, 2010, 38(5):693-696.
- [47] 叶曦雯, 蔡发, 牛增元, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱筛选法对电子电气产品塑料部件中有机锡的测定[J]. 分析测试学报, 2009, 28(12):1410-1414.
- [48] 冯流星, 马联弟, 韦超, 等. 同位素稀释质谱法测定聚丙烯塑料中 Hg 的含量[J]. 质谱学报, 2008, 29(1):6-9.
- [49] 苏锡辉, 张君. 聚乙烯塑料中铅迁移量的研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(4):171-172.
- [50] 周学忠, 符靛, 何晓梅. 高分辨质谱法测定医用硅橡胶中微量元素[J]. 橡胶工业, 2009, 56(12):757-760.
- [51] 周学忠, 聂西度. 高分辨 ICP-MS 测定涂料中痕量砷形态分布的研究[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(5):60-63.
- [52] 周牡艳, 鲍国芳, 吴坚, 等. ICP-MS 法测定纺织助剂中的重金属含量[J]. 印染, 2009, 35(21):35-36.
- [53] 李娜, 刘鹏宇, 颜广灵, 等. ICP-MS 法测定磁制冷材料-钎硅锆系合金中的杂质元素——中国有色金属学会第七届学术年会论文集[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008:679.
- [54] 郭鹏. 电感耦合等离子体质谱法测定高纯氧化钽中 28 种痕量杂质元素[J]. 分析试验室, 2008, 27(3):106-109.
- [55] 宋雪洁, 刘欣丽, 段大成, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定高纯氧化钽中的稀土杂质[J]. 分析化学, 2009, 37(12):1743-1748.
- [56] 墨淑敏, 潘元海, 王长华, 等. 电感耦合等离子体-质谱法测定高纯 ZnS 粉末中痕量金属杂质[J]. 分析试验室, 2010, 29(5):73-75.
- [57] 亢德华, 于媛君. 电感耦合等离子体质谱法测定再生锌

- 锭中7种痕量元素[J]. 冶金分析, 2008, 28(z1): 400-403.
- [58] 亢德华, 于媛君. 电感耦合等离子体质谱法测定转炉渣中痕量锌和铅[J]. 冶金分析, 2008, 28(z1): 388-391.
- [59] 冯先进. 电感耦合等离子体质谱法同时测定高纯硒中痕量锰镍锡铅铁[J]. 冶金分析, 2008, 28(z1): 377-379.
- [60] 黎蓉, 李娜, 童坚, 等. 离子交换色谱—电感耦合等离子体质谱法测定高纯钛中痕量杂质元素[J]. 分析化学, 2009, 37(5): 749-752.
- [61] 邵坤, 何启生, 陈开旭, 等. 密闭溶样—电感耦合等离子体质谱法测定煅烧高岭土中微量重金属元素[J]. 岩石测试, 2010, 29(1): 43-46.
- [62] 韩国军, 伍星, 童坚, 等. 膜去溶-ICP-MS测定高纯CeO₂中14种痕量稀土杂质分析方法研究[J]. 中国稀土学报, 2009, 27(1): 137-144.
- [63] 韩国军, 伍星, 童坚, 等. 膜去溶-ICP-MS法测定高纯Eu₂O₃中14种痕量稀土杂质[J]. 分析试验室, 2009, 28(11).
- [64] 于永波, 王克勤, 王皓, 等. 山西铝厂赤泥性质的研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(1): 63-66.
- [65] 粟永阳, 李志明, 董宏波, 等. 气溶胶直接进样电感耦合等离子体—质谱法快速测定环境气溶胶中²³⁹Pu [J]. 分析化学, 2010, 38(8): 1139-1143.
- [66] 陈多宏, 高博, 毕新慧, 等. 典型电子垃圾拆解区大气颗粒物中元素污染的季节变化特征[J]. 环境监测管理和技术, 2010, 22(4): 19-22.
- [67] 龙永珍, 邹海洋, 戴塔根. 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1633-1638.
- [68] 吕伟明, 张洁, 龚伟达, 等. ICP-MS测定地表水中多个元素的分析方法研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(4): 135-139.
- [69] 谢云欣, 李东雷, 左宇昕. ICP-MS检测饮用水中汞的方法研究[J]. 生命科学仪器, 2009, 7(12): 19-21.
- [70] 赵志飞, 储溱, 方金东, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定湖泊水中痕量溴、碘[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(3): 324-326.
- [71] 彭荣飞, 黄聪, 卓召模, 等. 碰撞池 ICP-MS 测定近海海水中的 Cr、As、Se、Cd、Cu、Zn、Hg 和 Pb [J]. 中国卫生检验杂志, 2008, 18(12): 2529-2531, 2542.
- [72] 吴颖娟, 陈永亨, 杨春霞, 等. ICP-MS 在土壤元素污染评价中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12): 2970-2974.

(上接第6页)

- [15] Liu Yongwen, Chang Xijun, Wang Sui, et al. Solid-phase extraction and preconcentration of cadmium(II) in aqueous solution with Cd(II)-imprinted resin (poly-Cd(II)-DAAB-VP) packed columns [J]. Anal. Chim. Acta., 2004, 519(2): 173-179.
- [16] Wang Sui, Zhang Ruifeng. Selective Solid-Phase Extraction of Trace Copper Ions in Aqueous Solution with a Cu(II)-Imprinted Interpenetrating Polymer Network Gel Prepared by Ionic Imprinted Polymer technique [J]. Microchim. Acta., 2006, 154(1-2): 73-80.
- [17] 苏蕾, 吴根华, 汪竹青. Cu(II) 离子印迹聚合物微球制备及其性能 [J]. 安庆师范学院学报自然科学版, 2010, 16(1): 81-84.
- [18] Say Ridvan, Birlik Ebru, Ersöz Arzu, et al. Preconcentration of copper on ion-selective imprinted polymer microbeads [J]. Anal. Chim. Acta., 2003, 480(2): 251-258.
- [19] Jiang Na, Chang Xijun, Zheng Hong, et al. Selective solid-phase extraction of nickel(II) using a surface-imprinted silica gel sorbent [J]. Anal. Chim. Acta., 2006, 577(2): 225-231.
- [20] Ersöz Arzu, Say Ridvan, Denizli Adil. Ni(II) ion-imprinted solid-phase extraction and preconcentration in aqueous solutions by packed-bed columns [J]. Anal. Chim. Acta., 2004, 502(1): 91-97.
- [21] 周政, 孙向英, 刘斌. 丁基锡印迹聚合物的制备及识别性能 [J]. 华侨大学学报自然科学版, 2007, 28(1): 38-41.
- [22] 刘斌, 张名楠, 孙向英, 等. 三苯基锡印迹聚合物的合成及吸附性能 [J]. 华侨大学学报自然科学版, 2005, 26(1): 47-50.
- [23] 辉永庆, 何小波, 邓义. 分子印迹聚合物对复杂体系中铅的分离富集 [J]. 中国工程物理研究院科技年报, 2008(1): 132-133.
- [24] 辉永庆, 钟志京, 何小波, 等. 铅分子印迹聚合物合成及其在痕量测量中的应用 [J]. 应用化学, 2009, 26(6): 721-725.
- [25] Gladis Joseph M, Rao Talasila P. Effect of Porogen Type on the Synthesis of Uranium Ion Imprinted Polymer Materials for the Preconcentration/Separation of Traces of Uranium [J]. Microchim. Acta., 2004, 146(3-4): 251-258.