

文章编号: 0254-5357(2009)01-0037-16

我国地质分析测试技术发展现状及趋势

尹明

(国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 论述了地质实验测试工作在多目标生态地球化学中的作用; 重点介绍了近年来国内外分析测试领域的研究动向和进展, 包括无机元素分析测试技术、元素形态分析测试技术、有机地球化学实验测试技术(环境有机地球化学实验测试技术和能源有机地球化学实验测试技术)、同位素分析测试技术、野外现场分析测试技术、无污染或低污染的“绿色”分析技术和样品制备技术方法、科学仪器设备的研发、实验室基础性工作和科研条件平台建设等方面的进展和取得的成果。探讨了我国地质分析测试研究工作存在的主要问题、与国外的差距和研究工作的有利条件和发展前景。全文引用文献 178 篇。

关键词: 地质分析测试技术; 现状; 发展趋势

中图分类号: O65 **文献标识码:** A

Progress and Prospect on Geoanalytical Techniques in China

YIN Ming

(National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: In this paper, the status and significance of geoanalysis in geological research and geological survey were demonstrated. The recent development of the geoanalytical techniques was reviewed briefly. The emphases was put on the tendency of geoanalytical technique development both domestic and abroad and also the progresses in research on geoanalytical techniques in CGS (China Geological Survey) laboratories in the last three years, including the techniques of inorganic analysis, organic analysis (environmental and petroleum geochemical analysis), isotopic analysis, field and *in-situ* analysis, “green” (pollution-free) laboratory and sample preparation, research and development of scientific instruments and devices, data quality control and reference materials, construction of the basic conditions for scientific research and etc.. On the basis of the domestic development, the problems in the scientific research and the disparity with that of the advanced countries were discussed. The favorable conditions and the development prospects, as well as the measures to promote the development of geoanalytical techniques were also discussed. 178 references were cited.

Key words: geoanalytical techniques; progress and prospect

地质实验测试工作是地质科学研究和地质调查工作的重要技术手段之一。其产生的数据是地质科学研究、矿产资源及地质环境评价的重要基础, 是发展地质勘查事业和地质科学研究的重要技术支撑。现代地球科学研究领域的不断拓宽对地质实验测试工作的需求日益增强, 迫切要求地质实验测试技术不断地创新和发展, 以适应现代地球科学研究日益增长的需求。

近年来, 我国地质实验测试技术的发展顺应了国际地质实验测试技术发展的大趋势和国家地质工作重大调整对地质实验测试工作的需求, 特别是结合新一轮国土资源地质大调查和重大地质工程项目的开展, 地质“野战军”装备规划实施, 大型科学仪器的引进, 极大地带动了实验测试技术的应用方法研究, 使分析测试新技术的推广和普及上了一个新台阶。本文在分析地质分析测试技术发展趋势的基础

收稿日期: 2008-09-27; 修订日期: 2008-10-26

作者简介: 尹明(1948-), 男, 山西交城人, 研究员, 主要从事等离子体光谱、质谱研究工作。E-mail: yinming@cags.net.cn。

上,总结近年来我国地质分析测试技术的发展现状以及存在的问题,指出优先支持重大领域或课题和加强关键地质实验测试技术与方法的研究,是进一步促进地质分析测试技术发展的重要方向。

1 地质分析测试技术的发展趋势

2006年9月,在北京召开了由中国地质调查局和国际地质分析家协会联合主办、国家地质实验测试中心承办的“第六届国际地质和环境材料分析大会(Geoanalysis 2006)”^[1-2]。这次会议的主题为“资源与环境材料的现代分析技术”。大会针对环境和地球化学研究中的分析技术、微区和原位分析技术、同位素地球化学和同位素地质年代学、数据质量控制与标准物质、勘查地球化学和地球化学填图中的分析技术、现场分析技术及仪器、样品制备技术、绿色实验室和分析技术等8个专题进行了充分的交流和研讨^[2]。

Geoanalysis 2006 国际会议进一步体现了近几届国际地质分析大会所表现出的地质分析领域的发展紧密围绕现代地球科学发展需求的特点,充分体现了地质实验测试技术从单纯资源分析向资源环境物料分析并重的发展趋势。地质实验测试技术从传统的无机分析向有机分析、形态分析,从宏观的整体分析向微观的微区原位分析,从单纯元素分析向同位素分析,从单元素化学分析向以大型分析仪器为主的多元素同时分析,从实验室内分析向野外现场分析拓展。适应现代分析测试仪器发展的绿色样品制备技术和方法、海量分析数据的自动化处理也成为当今地质分析研究的热点。质量控制,地质实验测试方法标准和相关技术规范的研究和制(修)订,标准物质的研制,功能强大、自动化程度高的专业化地质分析仪器及其辅助装置的研发也越来越引起国际地质分析界的重视。这些已成为当今全球地质实验测试技术发展的新趋势。

2 我国地质分析测试技术的发展现状

2.1 无机元素分析技术

无机元素分析技术的发展主要体现在X射线荧光光谱(XRF)、等离子体发射光谱(ICP-AES)、等离子体质谱(ICP-MS)等现代大型的多元素分析测试仪器的引进和普及,极大地推动了“十五”期间在痕量、超痕量元素新技术、新方法研究和针对不同地质调查目标的元素分析组合配套技术研究成果的应用推广,并取得了较大的进展。“十五”期间,在中国地质调查局的支持下,国家地质实验测试中心、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所和一些属地化实验室开展了“勘探地球化学样品中76个元素测试方法技术和质量监控系统的研究”、针对多目

标地质调查(54个组分)的“区域地球化学勘查样品分析方法”研究^[3-13]和“痕量、超痕量元素新技术新方法在地质调查中的开发应用”等配套测试方法的研究^[14-34]。研究工作所取得的成果,保证了多目标地球化学填图工作的顺利开展和“超低密度地球化学填图”项目的实施。“十五”期间建立的以XRF、ICP-AES、ICP-MS等现代大型多元素分析技术为支撑技术,如铈镧试金 ICP-MS 测定地质样品中铂族元素分析方法^[30],封闭压力酸溶 ICP-MS 直接测定47个痕量元素分析方法^[35],碱熔沉淀 ICP-MS 测定稀土等26个元素分析方法^[36],砷、锑、铋、硒、碲、钨、锡、汞的 AFS^[37]、ICP-AES^[38-39]和 ICP-MS 分析方法^[40],封闭压力酸溶 ICP-AES 测定地质样品中硼、砷、硫方法^[41],ICP-MS 测定地质样品中溴、碘、硒、砷^[42-43],高频红外测硫仪和离子色谱法测定地质样品中阴、阳离子等分析新方法进一步得到了推广应用和完善。在扩大测定元素范围的同时,提高了分析准确度和精密度,减化了分析流程,极大地提高了工作效率。目前,我国有21个省市自治区开展了多目标生态地球化学调查,涉及我国260万平方公里,已完成的土壤和沉积物定量分析样品超过200万件。这些项目的研究成果为地球化学调查工作提供了重要的技术支撑。

配合生态环境地球化学调查与评价项目对生物样品分析的要求,各地质实验室开展了针对生态环境地球化学样品分析方法体系的研究,并取得了一些重要成果^[44-46]。针对“全国地下水水质调查和污染评价”项目对一些重要元素分析的要求,各地质实验室应用 ICP-MS^[47]和高分辨连续光源原子吸收光谱(HR-CS-AAS)^[48]、氢化物发生-原子荧光光谱(HG-XRF)^[49-50]等现代多元素分析测试技术与传统化学分析方法相结合,开展了水样中重要金属、非金属元素的分析方法研究。国家地质实验测试中心近年来利用偏振激发能量色散X射线荧光光谱仪(EDXRF)开展了地质样品分析应用研究,在国内率先将该技术应用于地质样品分析^[51]和流体(卤水)样品中主量元素的测定^[52],并对偏振激发EDXRF空间分布特点进行了研究^[53]。

无机元素分析技术的进展还反映在地质样品微区痕量原位元素分析技术的应用研究。国家地质实验测试中心自2006年引进激光烧蚀-高分辨等离子体质谱(LA-HR-ICPMS)以来,进行了一系列分析方法研究工作^[54-56],开展了各种矿物剥蚀效率的研究,并对原有标配剥蚀池进行了改造;建立了多元素原位微区定量分析方法,探讨影响测定的各种可能因素;建立了基体归一校正方法,使测定可以不必事先通过其他仪器测定内标元素,并已很好地应用于

钻石中微量元素的分析^[56]。该技术在矿物微区痕量元素定量分析中已初步显示出广阔的应用前景。

2.2 元素形态分析测试技术

元素化学形态分析是现代分析化学研究的前沿课题,是研究元素循环、迁移和转化的基础工作,是生态环境地球化学调查与评价的重要依据,也是近年来对元素分析领域的一个重要拓展。

近年来,国内地质实验室元素化学形态分析的研究和应用工作的主要方向和领域之一是围绕目前国内开展的多目标生态地球化学调查,开展土壤样品中 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr、Cd、As、Sb、Hg、Se 等 12 个元素的顺序提取、相态分析方法的研究和完善^[57-62]。顺序提取共分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、弱有机结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态共 7 个相态提取和分析,这部分研究工作主要由安徽地质实验研究所、武汉综合岩矿测试中心、南京综合岩矿测试中心等单位承担。建立的方法已开展了多次比对,并广泛应用于多目标地球化学调查,完成了数以万计的样品分析,在生态地球化学调查与评价中发挥了极为重要的作用。其特点是研究新方法将 ICP-AES 和 ICP-MS 等高灵敏度、高精密度的现代多元素同时分析技术与传统化学分析技术相结合,极大地提高了方法的灵敏度,扩展了测定元素的范围,提高了分析效率。

与技术方法研究相配套,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研制了 6 个有效态国家一级标准物质(CBW 07412 ~ CBW 07417)。国家地质实验测试中心在国家科研基础条件平台项目的支持下,研制了 3 个土壤和沉积物(黄土、湖底沉积物和人口密集区土壤样品各 1 个)中 13 个微量元素顺序提取标准物质,按我国的 7 态定值,并与 Tessier 的 5 步和欧盟 BCR 分步提取流程进行了比较,该研究成果被批准为国家一级标准物质。该系列标准物质的研制填补了国内形态分析没有标准物质的空白,部分指标达到国际领先水平。中国地质调查局使用该系列国家标准物质,组织了 3 个年度的形态分析比对试验,显著提高了地质实验室土壤(沉积物)形态分析的技术能力和数据可比性,同时验证和统一了生态地球化学评价样品形态分析方法。该系列标准物质的研制为建立土壤和沉积物中重金属顺序提取形态分析技术体系和质量监控体系奠定了坚实的基础。顺序提取-相态分析方法和研制的标准物质在地质实验室得到了广泛的普及和应用。在生态地球化学调查评价样品分析中,近 30 个实验室使用该分析方法和系列标准物质完成了 20000 余件样品的测试,保证了数据质量。该研究成果获得 2008 年国土资源科技成果二等奖。

近年来,国内地质学界在元素化学形态分析的研究和应用工作上的另一主要方向和领域是围绕生态地球化学研究,开展重金属有机化合物和非金属形态分析方法研究^[63-68]。该研究旨在获取重金属元素在土壤、水、生物体内的形态分布、转化和迁移的信息,并进一步为其生物有效性和毒理性研究提供基础信息,为重金属污染的控制与修复、地方病的防治和改善人类生存质量提供科学指南。2006 年以来,挂靠在国家地质实验测试中心的中国地质科学院生态地球化学重点开放实验室的研究人员系统开展了元素形态分析方法研究,采用气相色谱(GC)、高效液相色谱(HPLC)等技术与 ICP-MS 联用,建立了包括元素价态、金属有机化合物、生物可利用有效态的形态分析体系,并取得了初步研究成果。开展了碘的形态分析方法研究,建立了环境样品中碘的形态分析方法,为碘在环境中赋存的形态及其相互转化,以及生物有效性或毒理性研究提供了实用的分析技术^[66-68];开展了汞的形态分析方法研究,建立了碱消解-HPLC-ICPMS 测定生物样品中的甲基汞与乙基汞的方法^[69]。目前正在开展砷、锡、铅等金属有机化合物分析方法研究、溴的形态分析和有关镉超积累植物中镉的形态分析等研究工作。该研究工作是现代分析化学研究的前沿领域,在研究工作中注重广泛开展国际合作。国家地质实验测试中心研究小组与美国佛罗里达大学、佛罗里达国际大学、比利时根特大学、美国地质调查局等国际知名大学和研究机构建立了长期开展学术交流和合作研究的关系,充分体现了开放、联合的合作研究和资源共享的机制。

2.3 有机地球化学实验测试技术

地质实验测试技术从传统的单纯无机分析发展为无机分析和有机分析并重,多方位、多技术、多手段为矿产资源、农业和生态环境等领域的研究和调查提供基础数据,是近年来地质实验测试技术发展的最突出的特点。环境有机地球化学和能源有机地球化学实验测试技术的研究和应用已取得显著成果。

2.3.1 环境有机地球化学实验测试技术

在地质“野战军”装备计划的大力支持下,地质实验室引进了吹扫-捕集进样系统、快速溶剂萃取、微波萃取、圆盘萃取等有机分析样品前处理系统和气相色谱、高效液相色谱、气相色谱/质谱、超高效液相色谱等现代先进有机分析仪器和设备,保证了有机分析测试技术发展所需的硬件设备,推动了有机地球化学实验测试技术的研究和应用,并取得了显著的成果^[70-91]。近年来,围绕“全国地下水水质调查和污染评价”、“全国土地污染现状调查”和“大陆科学钻探工程(CCSO)”等国家重大项目,开展了有机地球化学实验测试技术研究工作。针对“全国地

下水水质调查和污染评价”项目中要求的87项必测和选测的有机污染物分析项目,开展了地下水中挥发性苯系物、卤代烃和有机氯农药、苯并(a)芘等必测组分测定方法的系统研究,建立了顶空气相色谱法测定地层水中的苯系物^[71]、水中石油类有机污染物的定性分析等分析测试方法^[72]、大口径毛细管柱气相色谱法测定水中15种有机磷农药^[83],并结合地下水水质检测中有机污染物分析的质量异议问题开展研究工作。研究成果在行业内迅速推广应用,满足了全国地下水调查、全国地下水监测的高灵敏度、高准确度大批量检测任务的需求。

针对多目标地球化学调查与评价中主要有有机污染物分析的需求,建立了高效液相色谱-荧光-紫外串联法测定土壤中16种多环芳烃^[81]和水、土壤样品中挥发性卤代烃、苯系物、有机氯农药、有机磷农药、酚类化合物^[85]等有机污染物分析方法,对所建立的分析方法进行应用考查、比对及有效性评价,形成了一套相对快速、经济的地质样品中有机污染物分析方法,已在多目标地球化学调查、土壤质量调查中得到推广和应用;开展了多氯联苯^[79]、邻苯二甲酸酯类等环境激素类有机污染分析方法研究,满足当前环境、生态地球化学调查需要,开展了海洋沉积物中吸附态轻烃的气相色谱分析研究^[89];结合中国大陆科学钻探工程,开展中国大陆科学钻探工程主孔0~2000 m超高压变质岩中有机质的检出及成因研究^[90]和大陆深钻超高压变质岩中可溶有机质提取^[91]等研究;开展了天然气气体水合物检测技术、微区分析新技术“激光微裂解-气相色谱-有机质谱法测定煤中有机物”等前沿新技术、新方法研究。

有机实验测试技术研究工作突出的特点之一是研究起点高,研究工作广泛采用了新技术。国家地质实验测试中心在地质“野战军”装备规划和中央级科研事业单位修购专项的支持下,围绕地质调查专项的要求和有机分析测试技术的最新发展,在地质系统率先引进了先进的有机实验测试仪器设备,建立了基于当今先进样品提取、净化、分析等有机检测新技术的分析方法,以满足地质调查样品快速、环保、灵敏、高通量的分析要求,力争与国际水平接轨。

吹扫-捕集/气相色谱-质谱法是目前国际上最灵敏的水中挥发性有机物的分析方法。针对地下水中挥发性有机物含量一般为痕量到超痕量水平、分析过程极易挥发损失和相互交叉污染等特点,将吹扫-捕集/气相色谱-质谱法引进到地下水挥发性有机物的测定,避免了样品采集、保存和检测过程的污染和挥发损失以及常规顶空、直接进样分析法灵敏度低、易损失、易污染的缺点,使得地下水中挥发性有机物分析指标达到国际先进水平。

固相萃取技术是近年来用于大体积液体样品富集和净化的样品处理新技术,具有简单、快速、污染小、适用于批量样品的分析等优点,可以避免传统、常规的液-液萃取技术劳动强度大、分析效率低、有机溶剂用量大、易造成二次污染等问题。针对地下水中挥发性有机物含量低、样品分析前需要大体积富集的特点,积极研究和开发固相萃取新技术,确保检测方法灵敏、准确、高效。目前研究开发的“圆盘固相萃取-气相色谱法测定水中16种有机氯农药和13种有机磷农药”^[86]、“固相萃取-高效液相色谱法测定水中有机酚”、“圆盘萃取-气相色谱/质谱法测定水介质中多氯联苯”和具有我国自主知识产权的“502树脂固相萃取水中多氯联苯”等系列分析方法大大提高了样品分析效率和分析准确度、减少了大量有机溶剂对环境造成的污染,满足地下水中主要半挥发性有机污染物检测的迫切需要。

土壤、底泥等复杂基质中痕量有机污染物分析是目前有机污染物分析的又一难点。现代微波萃取、加速溶剂萃取等固相提取新技术与固相萃取、凝胶色谱净化新技术的结合,使得土壤、底泥等复杂基质中有机污染物的分析效率成倍提高,有机试剂用量大幅降低,分析方法更加灵敏、准确,避免了常规索氏抽提分析流程长、使用大量有机溶剂的缺点。建立的“微波萃取-气相色谱/质谱法测定土壤样品中多氯联苯”、“加速溶剂萃取-气相色谱/质谱法测定土壤样品中多氯联苯”、“加速溶剂萃取-气相色谱/质谱法测定土壤样品中邻苯二甲酸酯”、“加速溶剂萃取-气相色谱/质谱法测定土壤样品中有机氯农药残留量”等系列分析方法^[82],已在多目标生态地球化学调查、土地质量调查中发挥积极作用。

随着有机物污染检测技术的发展,寻求有机污染物高灵敏检测的新技术也是有机污染检测发展的方向。针对多氯联苯中高氯化化合物常规检测灵敏度低和地下水样品中有机氯农药污染物需要大体积富集、浓缩给样品采集、运输、提取等带来的问题,研究和开发了“气相色谱/质谱/负化学电离源法测定多氯联苯”和“大体积进样高灵敏度检测地下水样品中有机氯农药残留量”的检测新技术,大大提高了多氯联苯、高氯化化合物、有机氯农药的分析灵敏度;提出了“电子轰击源与负化学电离源联合定量测定多氯联苯”的新方法,弥补了常规电子轰击源定量分析的不足,使多氯联苯检测更加灵敏、准确。同时大体积进样、高灵敏度检测新方法大大减少样品富集倍数和有机试剂使用量,分析方法更加简单、环保,为减少样品采集量探索了一条新路。

自2006年以来,地矿系统的环境有机地球化学分析实验室已完成“珠三角”、“长三角”、“环渤海”

等地区地下水水质调查和污染评价项目和地下水监测项目的4000多组样品和37个有机污染物组分的测定任务,支持了国家相关重大科技项目的开展。

实验测试标准化工作滞后是当前地质实验测试工作存在的突出问题之一,有机实验测试技术的发展在起步阶段就重视到这个问题。为使有机实验测试技术方法的标准化具有统一的分析测试质量管理规范,为地质调查工作和环境质量评价提供可靠数据,近年来国家地质实验测试中心先后在《地质调查技术标准研制、修订与升级》、《地质调查实验测试方法系列标准研制与修订》等地质调查项目的支持下,开展了“水介质中有机污染物-挥发性卤代烃分析方法”、“地下水中有有机氯农药分析方法”等行业标准的研制,极大地促进行业有机分析测试技术的标准化建设。

2.3.2 能源有机地球化学实验测试技术

近年来,地矿部门的油气项目逐年迅猛增加,已达到每年数亿元经费的规模;但与之不相适应的是国土资源部系统至今还没有一个开展油气地球化学研究的分析实验室。因此,建立国土资源部系统第一个油气地球化学分析实验室被列入国家地质实验测试中心“十一五”科技发展规划的重要目标之一。该实验室研究工作取得了初步成绩^[92-94],具备了常规油气地球化学的分析测试能力,包括烃源岩总有机碳(TOC)分析、Rock-Eval分析、氯仿沥青“A”分析、烃源岩抽提物和原油的石油族组分分析、饱和烃气相色谱分析、饱和烃气相色谱-质谱分析、芳烃气相色谱分析、芳烃气相色谱-质谱分析、单分子饱和烃的碳同位素比值分析。在新技术方法的应用与开发方面,通过引进加速溶剂萃取技术(ASE)改进了氯仿沥青“A”的抽提与定量分析技术;通过对石油族组分分析的棒薄层色谱技术(TLC-FID)的系统研究,修正并充实了该技术的层析条件和定量依据;通过对中压液相色谱技术(MPLC)在石油族组分分离制备上的应用研究,实现了对饱和烃、芳烃馏分制备的仪器化。随着地质“野战军”装备规划的落实,能源有机地球化学实验测试的能力还会进一步得到加强。

与此同时,在中国地质调查局的支持下,吉林地质科学研究所油气地球化学分析实验室开展了“油页岩含油率分析标准物质研制”项目研究,完成了5个样品的采集、加工制备、粒度检验和细碎。5个样品基本代表了我国典型矿区或矿床,如农安油页岩矿区以规模大著称,桦甸油页岩以高含油率为特点,茂名油页岩以南方生物成因为典型代表。样品含油率梯度分布合理,基本涵盖了我国目前已发现油页岩矿石的低、中、高品位含量,可满足实际工作需要。

2.4 同位素分析测试技术

同位素测定新技术新方法研究主要集中于同位素测年技术和稳定同位素地球化学在地质调查中的应用研究。这些工作开展微区原位同位素、高灵敏度同位素、复杂样品同位素等测试技术研究,建立和完善几种关键性的同位素测试新技术新方法,如激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术方法、自旋共振(ESR)测年技术方法、 ^{36}Cl 和 ^{137}Cs 定年方法体系以及Re-Os和Pt-Os同位素定年方法体系,开展了高压白云母中过剩氩成因研究、褐帘石离子探针(SHRIMP)原位微区U-Th-Pb年龄测定方法研究、激光烧蚀-高分辨等离子体质谱(LA-HRCPMS)测定钻石中U/Pb同位素年龄方法研究、MC-ICPMS过渡族元素同位素测定技术方法研究。特别是二次离子探针质谱(SHRIMP)引进几年来,将微区同位素测年推向新的水平,提高了我国的同位素测试水平和为地质科研和地质调查服务的能力;建立了鞍山、黄陵、胶东、太行山、辽北等地早期寒武纪构造年代格架;获得了Jack Hill地区世界上第三粒最老锆石年龄(43.3 Ga),发现在该锆石边部存在3.7Ga增生边,揭示明西澳(43.3 Ga)与3.7Ga陆壳物质之间存在联系等一系列重要的成果。

Re-Os和Pt-Os同位素系统示踪及定年应用方法研究取得了重要进展,所建立的分析方法得到了广泛的应用^[95-131],研究成果获得国土资源部2005年科技成果二等奖。特别是在科技部基础性工作专项资助下,国家地质实验测试中心Re-Os地质年代学研究小组成功研制了两个国际上首例辉钼矿Re-Os年龄国家一级标准物质,为国内外Re-Os年龄实验室建立了科学数据比对的共同尺度,起到了消除国内外实验室之间的系统误差和检验新研究流程正确性的作用;中国科学院、中国科学技术大学等单位以及美国和日本等实验室,均采用该标准物质作为实验室监控样;同样受科技部基础性工作项目专项资助,该小组正在研制的符合国家一级标准物质要求和国际定值规则的首个铜镍硫化物和海山富钴结壳的Re、Os含量及Os同位素比值的标准物质工作也取得了重要的进展。金属矿床精确定年技术方法、地质应用研究、年轻沉积物同位素定年、同位素示踪方法研究、锆石的阴极发光标型特征及其成因的研究都取得了重要进展。

多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)是20世纪末发展起来的同位素高精度测试新技术。与传统的热电离质谱相比具有多方面的优势:①提高电离效率,可对采用热电质谱(TIMS)技术难以有效电离的元素(如Hf等)进行高精度同位素比值测定;②运用元素内标或标样-样品交叉法(Standard -

Sample Bracketing),对Fe、Cu、Zn、Mo、Cr等金属元素同位素进行高精度测定;③与激光进样系统联用,进行微区原位同位素测定;④提高Sr、Nd、Pb等传统同位素的分析效率。近年来,中国科学院、国土资源部、高等院校等科研和教学部门先后建立了MC-ICPMS实验室,特别是在非传统稳定同位素和原位锆石Hf同位素分析方面取得了一批较高水平的研究成果。

国土资源部同位素地质重点实验室2006年引进MC-ICPMS仪器以来,在非传统稳定同位素研究方面取得的一些重要进展。突出表现在:①在国内率先建立了Fe、Cu、Zn、Mg等同位素的高精度测定方法和与之配套的样品纯化技术,并初步研制了这些同位素体系的标准物质,从而为我国科技工作者在该国际前沿领域开展高水平研究奠定了必要的基础^[132-140];②开展了Fe、Cu、Zn、Mg等同位素的质量分馏研究,丰富和发展了非传统稳定同位素质量分馏理论,为这些新同位素体系在地质中的应用奠定了必要的理论基础^[141-144];③开展了前寒武纪条带状铁建造的铁同位素地球化学研究,为运用过渡族元素同位素对金属矿床成矿作用的直接示踪提供了范例,从而开辟了我国金属矿床成矿作用研究的新途径^[145-146];④开展了湖泊、海洋沉积物和悬浮物的过渡族元素同位素研究,为环境与全球变化研究提供新手段^[147-149]。

中国地质科学院矿产资源研究所同位素研究组系统地开展了硅同位素地球化学研究^[150-154]。在国家自然科学基金委员会、国土资源部和中国地质调查局的大力支持下,开展了《地球表面圈层硅同位素地球化学循环研究》、《同位素测试新技术的地质应用研究》和《硅同位素与原子量测定》等研究项目,加深和拓宽研究领域,进一步完善硅同位素地球化学学科体系。其研究成果主要表现在:①准确标定NBS-28等国际与国家硅同位素参考物质的硅同位素绝对比值与硅的原子量;②改进的硅同位素测试方法得到国际同行的承认;③研制并标定了国家一级硅同位素标准物质;④在水圈、生物圈硅同位素地球化学循环的新的、交叉学科的研究方面取得重要突破。一些重要研究成果为研究河流的侵蚀沉积作用和环境影响提供有力证据,并为地球表面圈层的硅同位素地球化学循环研究提供重要资料。该研究成果获得2006年国土资源科学技术二等奖。该研究小组还与长江委水文局合作,依托地质调查项目《长江流域侵蚀、沉积作用与环境的同位素研究》,开展了《长江水的化学与同位素演化及其环境意义》的研究。项目组已在长江干流和支流系统采样,对水及水中悬浮物进行矿物学、地球化学与同位素

地质学综合研究,获得了许多新的发现。这些发现为了解长江流域的气候与水文变化、三峡工程对河水化学与同位素组成变化的影响,以及水圈的硅循环的研究提供了极为珍贵的资料,奠定了良好的基础。该研究小组还在中国地质调查局的支持下,开展了“激光探针微区稳定同位素分析方法及地质应用研究”,成功建立了一套激光探针微区氧、硅同位素分析系统(包含对激光熔样装置的研制和纯化系统的改进)。利用这一分析系统,研究人员对样品准备、试剂纯化、装样和预处理、激光制样、气体提取与纯化、质谱测量等各个环节进行反复摸索,建立了激光氧、硅同位素分析方法,分析精度均达到了国际同类研究的先进水平。激光氧同位素分析方法的样品含O₂量可低至7 μmol(相当于200 μg O₂),分析精度约为0.2‰;激光硅同位素分析所用的样品Si含量可低至5 μmol(相当于140 μg Si),分析精度优于0.2‰。与此同时,项目组研制了石英玻璃和锰铝石榴石两个激光氧、硅同位素分析工作标准物质,填补了国内有关领域的空白,为激光同位素分析在国内地质领域的应用和推广奠定了基础。项目组对伟晶岩、辉长岩、地幔包体等难熔矿物进行了氧、硅同位素分析,初步探索了该技术在地质方面的应用。这些成果填补了国内在有关领域的空白,为激光硅、氧同位素地球化学研究的进一步发展创造了条件。

国家地质实验测试中心利用MAT 253气体同位素质谱仪,开拓了环境地球化学单体同位素分析测试技术研究的新领域。先后开展了连续流稳定同位素气体质谱测试技术及其在地质研究中的应用、生物标志化合物单体同位素分析、单分子稳定同位素分析在地质研究中的应用、大陆科学钻探孔区地下深部流体及微生物研究、科学深钻的地下微生物及地下流体研究等。获得的初步研究成果包括:①建立了元素分析-同位素质谱(EA-IRMS)分析沉积物、土壤和植物等样品有机碳、氮同位素的方法;②建立了GasBench II-IRMS分析水中氢氧同位素的方法^[155];③建立了GC-C-IRMS分析天然气中低碳烷烃碳稳定同位素的方法。其中,EA-IRMS分析沉积物、土壤和植物等样品中碳、氮同位素和GasBench II-IRMS分析普通水中氢、氧同位素的测试水平达到国内外同类实验室的水平。同时,在开展生物标志化合物单体碳同位素前处理方法的研究中也取得了初步成果。这些实验测试方法体系的建立与完善将为生态环境地球化学交叉学科的研究提供坚实的实验测试平台。

2.5 野外现场分析测试技术

利用现代分析测试技术,开展野外现场分析技术研究,为地学科研和矿产勘查提供及时、可靠乃至决

策性的现场测试数据支持,是地质实验测试技术发展的重要方向之一。近年来,地质科研、地质调查野外现场分析技术有了长足的发展。大陆科学钻探工程(CCS D)的开展,有力带动了现场分析技术的发展,特别是科学钻探现场流体分析技术达到目前国际水平,为地下流体地球化学研究提供重要信息^[156-162]。国家地质实验测试中心先后承担了流体地球化学实验室建设、大陆科学钻探孔区地下深部流体与微生物研究科学深钻的地下微生物与地下流体研究、多功能车载野外实验分析装备研制等多项国家级工程或科研项目,开展了大量现场分析研究工作。

在大陆科学钻探工程中,国家地质实验测试中心负责的流体地球化学实验室配备了GC、HPLC和小型气体质谱仪等多种现代分析设备,对钻井过程中泥浆的气体 and 离子组成进行了不间断测量和实时气体数据跟踪,得到了CCSD的5158 m主孔气体(H_2 、He、 CH_4 、 O_2 、 N_2 、Ar和 CO_2)和泥浆中阴阳离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的完整剖面,为钻井过程决策和相关项目的科学研究提供了大量有价值数据。取得的成果有:①通过 H_2 的异常升高为钻头磨损提供实时指示;②捕获了苏门达腊、昆仑山西口等8级以上大地震造成的CCSD流体异常数据,发现了地震与流体异常的相关性^[156-158];③对He异常中的幔源成分进行了解析^[161],证实了存在幔源流体的贡献;④对 H_2 、 CO_2 的大异常进行了现场实验研究,证实由泥浆分解产生的 CO_2 和 H_2 与来自地下的流体并存是4820~4930 m井段极高异常的原因^[159];⑤甲烷异常与晶洞具有极好相关。

目前正在开展的以国家地质实验测试中心为牵头单位,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、勘探技术研究所、北京探矿工程研究所参加的国家“863”项目“多功能车载野外实验分析装备”课题的主要目标是面向西部偏远覆盖区的矿产勘查,集浅钻取样、制样和现场分析于一体。该课题强调快速性、经济性和有效性,划分为钻探取样、贱金属分析、贵金属分析、气体分析、车载集成等若干模块,并按模块相对独立地开展。这也为研究成果的扩展应用打下了好的基础。例如气体分析可独立应用于科学钻探现场,贱金属、贵金属可应用于钻探现场等。目前,各模块正在按分工开展工作,已取得一些初步研究成果。项目研究目标的实现将极大地推动野外现场实验测试技术的跨越式发展。

2.6 绿色分析技术和样品制备技术方法

无污染或低污染的“绿色”分析技术和样品制备技术方法的开发也成为当今国内地质实验测试技术发展的趋势。国家地质实验测试中心在国内率先开展了样品粒度与分析测试中最低样品消耗量间关

系的研究^[163-167],对涉及不同类型地质样品的粒度、样品代表性和最小取样量的应用基础理论进行了探讨,并取得了初步成果^[167]。证明了当样品粒度 $<30\ \mu m$ 时,取样量减小到2 mg仍能保证试样的代表性,使样品溶解的总用酸量减小到0.5 mL,较常规方法酸的消耗量降低了100倍,并大大减小了溶样时间,提高了分析效率。这种前瞻性的应用基础理论研究的突破,不仅将降低分析成本,提高分析效率,而且还将极大地减小分析试剂对环境的二次污染。这项研究的突破将成为分析化学中的一次重要的理论和实践的创新。

国家地质实验测试中心还结合地下水、土壤中有机污染物调查,开展了固相萃取、加速溶剂萃取等低污染样品处理技术的研究,并取得了进展。

2.7 实验室基础性工作和科研条件平台建设

围绕现代分析测试技术产生的海量数据,实验室信息管理系统(LIMS)和实验测试质量控制与标准物质的研制也越来越引起重视。在“十五”期间,国家地质实验测试中心、中国地质调查局宜昌地质矿产研究所和武汉综合岩矿测试中心开展LIMS的研究并获得重要进展的基础上,国家地质实验测试中心和宜昌地质矿产研究所对研究成果进行了进一步的完善。宜昌地质矿产研究所的研究成果在中国地质调查局的支持下,开始在全国地质实验室推广。利用现代化计算机和信息技术,实现海量实验数据的储存、管理和共享,完善实验室质量控制体系仍将是今后地质实验测试工作重要环节和研究热点。

科技条件平台建设的另一重要成果是中国地质科学院北京离子探针中心的科技人员在国内外首次攻克了基于软件测控大型离子探针质谱仪远程共享系统(SROS)的操作技术,实现了在Internet公共网络环境下,以远程实时操作实验为目的的大型科学仪器的远程共享。自2005年9月,北京离子探针中心已实现与国内外多个著名大学和研究机构间SHRIMP II的单向控制和双向互控。该成果为国家科技基础条件平台建设,特别是大型仪器设备的远程共享开创了成功的先河,起到了示范作用,受到科技界广泛的赞誉和高度评价。中国地质科学院北京离子探针中心SHRIMP II离子探针质谱仪的远程共享成果不仅使我国在国际同位素地质研究中占有重要的一席之地,而且也将促进实验科学研究观念和方式的变革。

近年来,国内地质实验室重视地质实验测试技术的标准化研究工作,在国家科研院所基础性专项和地质调查项目的支持下,修订了一系列地质实验测试方法标准,研制了一批地质标准物质,制定了一些重要的地质实验测试技术标准和规范,这些标准

和规范在地质科研和地质调查中发挥了重要作用^[168-173]。

2.8 科学仪器设备的研发

国家重视具有自主知识产权,先进、适用的专业化地质分析仪器及相关辅助设备研发,这也将成为今后地质分析研究的重要领域。

地质分析测试仪器的研制可追溯至20世纪70年代。自2001年,国家地质实验测试中心连续3次通过竞标主持了国家“十五”重大科技攻关项目《科学仪器的研制与开发》中的《科学仪器支撑装置和系统的研制与开发》、《样品自动化前处理仪器设备的研制与开发》和“十一五”国家科技支撑计划重大项目《科学仪器设备研制与开发》中第一课题《高稳定度光源的研制与开发》。其中“十五”的第一、二两个课题已分别于2004年2月和2007年6月通过验收,研发成果获得相关专家和科技部的好评,研究成果获2008年国土资源科技成果二等奖。

随着现代地球化学、农业和环境地质学的发展以及多目标地质调查工作的需求,一些常规和大型的分析测试仪器在地质系统得到了广泛应用。针对这种形势,近年来,科学仪器研发的重点聚焦于与大型分析测试仪器相配套应用的样品前处理装置和部分中小型专用仪器设备的研发工作,并取得了一些进展。

在样品自动化前处理装置的研发工作中,结合当前国内外技术的发展方向,进行了绿色低污染溶剂萃取技术,样品分析测试中的在线分离、消解等多功能模块化预处理技术,复杂样品中目标化合物的提取及富集技术,样品溶液自动化比例进样及处理技术方面仪器设备的研发。

在绿色低污染溶剂萃取技术方面,先后研制了顶空、吹扫捕集无溶剂萃取装置,全自动多路加温加压快速溶剂萃取仪,光纤控温微波萃取装置,小型在线加速溶剂萃取仪和六路并联全自动快速溶剂萃取装置等设备及装置中的高压、高温萃取池,压紧式密封和完全独立的上下双截止阀设计,小型在线加速溶剂萃取仪与气相色谱在线联用设计,光纤控温及微量可燃性气体控制保护等具有自主知识产权的关键技术。

在样品的分离、富集技术和溶液自动化处理技术方面,研制了亚临界、超临界流体萃取装置,凝胶渗析萃取装置,带有分离、富集、萃取等样品预处理功能模块的全自动顺序注射在线四道样品/试剂引入装置等设备以及设备中阀体的自动控温设计,低脉动泵和可调波长紫外检测器设计,时间模式馏分收集设计等具有创新性的技术。

结合地调项目,研发了元素有机形态分离及检测设备和自动在线预处理水质分析装置。利用元素

有机形态分离及检测设备,进行了地球化学土壤、底泥样品中As元素形态的最佳提取试剂配比、提取条件和测试方法研究,同时进行了地下水、地表水、生物体液及组织中As元素形态的检测试验探讨,取得较满意的检测效果。目前,国家地质实验测试中心与北京吉天仪器有限公司联合研发的专门用于生态环境地质调查中重要有毒有害元素As、Hg、Sn、Pb、Se、Cd形态分析的AS-10型元素形态分析仪已进入应用研究阶段^[62],并于2008年通过鉴定,进入分析仪器市场,将在地下水污染调查中发挥重要作用。

在自动在线预处理水质分析装置的应用研究中,通过不同模块的功能组合,使其能自动完成消解、加热、蒸馏、萃取、分离等工作,能够对饮用水、地表水、污水、工业废水的氰化物、挥发酚、总磷、阴离子表面活性剂进行在线处理和检测。此项技术和装置的推广应用,可以大大提高分析速度、准确度和精度,减少样品和试剂的消耗,减少不同水平分析测试人员手工操作带来的误差和环境污染。

以国家地质实验测试中心为主的研发团队在近三年的工作中,在许多关键技术上都形成了自主知识产权,先后申请了15项专利(已授权7项),发表了相关论文10余篇,取得了较好的成绩^[174-177]。

除此之外,“十五”期间,成都理工大学研制开发了便携式现场X荧光分析仪^[178],该仪器在引进美国新产品电致冷Si-PIN探测器的基础上,研究开发了2048多道分析器,高、低压电源和系统控制、采谱程序和分析方法软件。该仪器首次在同类型仪器中使用功能完整的基体校正模式,为进行基体复杂的地质、矿物样品分析打下了基础,有望在国土资源地质大调查现场分析中得到应用。

特别值得一提的是,中国地质调查局南京地质矿产研究所研制的便携式近红外矿物分析仪的成功研制为硅酸盐矿物、含羟基硅酸盐矿物、硫酸盐矿物和碳酸盐矿物的野外现场分析提供了准确、简便、适用的手段,并已得到推广应用,取得了较好的经济效益和社会效益。

这些成果的取得都不同程度地抓住了分析测试仪器、装置的研发与升级改造技术研究的关键:①重视对关键技术的攻关;②充分利用现代电子技术、计算机自动控制技术和精密加工等技术实现分析测试仪器的自动化、智能化和标准化;③注重建立产、学、研相结合的分析仪器使用、升级改造、研制三位一体的科学仪器新研发机制,开发拥有自己特色、优势及知识产权的科学仪器、装置,以充分发挥和挖掘现有资源的潜力;④与企业结合,推动研发成果的产业化。这些成果也为今后分析测试仪器、装置的研发与升级改造创造了经验。

3 我国地质分析测试技术发展现状分析

3.1 与国外主要差距

与国际先进地质实验测试技术的现状与发展相比,我国在硬件设施上已处于国际先进水平,差距主要表现在4个方面:①科技理念上的差异。缺乏面对地球科学研究需求转变的敏感性,在“以人为本”,特别是人才的投入和培养机制、方式上存在显著的差距;②在鼓励自主创新方面,缺乏足够的经费投入和具体可行的措施;③地质实验测试标准化工作严重滞后,难以满足地质科研和调查的需求;④重实验测试仪器设备采购,轻实验测试仪器设备的自主研发。这使得中国的地质分析科学家们的研究工作只能被动地跟在国外同行的后面,难以进入国际先进行列。

3.2 存在的主要问题

当前地质分析技术研究与发展仍然存在许多问题和不足之处,与国家地质分析的要求相比,还存在较大差距。

3.2.1 管理体制和运行机制问题

我国地质分析测试部门存在的管理体制和运行机制问题主要反映在以下方面。

(1)目前,部门地质实验测试工作还缺乏统一、完善、高效的管理体系,各地地质实验室缺乏根据专业需求和整体布局的明确定位和合理的分工,在专业发展方向上存在交叉重复。

(2)地质实验测试工作缺乏系统的整体规划,缺乏长远发展目标。规划与计划存在脱节现象,计划随意性强。项目缺乏统一部署,缺乏大项目机制,集中体现在项目小而散,难以形成有影响的大成果,存在低水平的重复研究。

(3)科技创新和面向地质科研地质调查的服务意识和能力不强,在实验测试技术应用理论的原始创新,新技术应用的集成创新和引进技术的消化,再创新能力不强,技术创新主要还停留在跟踪国外新理论、新技术的水平上,难以取得突破性的、国际一流的成果;实验测试技术主动服务于地质科研和调查的意识不强,从地质科研、地质调查的实际出发,解决重大地质理论、技术、方法的支撑能力不足。地质实验测试技术服务于社会和公众的意识和能力也不强。

(4)实验测试技术与地球科学研究和地质调查的需求结合不够紧密,一些项目缺乏明确的科学目标,针对重大地质科学问题的技术攻关和分析测试体系的建设重视不够,一方面导致研究与应用存在脱节现象,另一方面形成的成果难以推广。地质科研人员与技术人员的脱节是重要原因之一。

(5)拥有庞大的实验测试体系和大量先进的实

验测试装备,但力量分散、研究工作各自为政的现象严重,仍未摆脱封闭式研究的模式。开放、联合、设备和信息等科技资源共享的研究机制远未建立,这也是难以取得重大技术进步和科研成果的原因之一。

(6)缺乏“以人为本”的理念,难以充分调动科技人员积极性,缺乏支持探索、鼓励创新、弘扬严谨学风、献身地质科研事业和切实加强科研团队建设的激励机制和措施。同时也缺乏吸引国内外一流科技人才,稳定现有高水平研究人才的机制和措施。

(7)缺乏开展地质实验测试技术“走出去”、“请进来”的对外交流机制。开展地质实验测试技术研究的国际合作和交流仍是地球科学研究中较为薄弱的环节,也是制约地质实验测试科研工作取得跨越式发展的重要原因之一。

3.2.2 地质实验测试研究方法研究存在的问题

地质实验测试研究方法研究存在的问题主要体现在以下方面。

(1)实验测试新技术、新方法的创新不突出,成果综合与集成程度不高,难以形成重大成果。

(2)重研究,轻推广。一是新技术方法难以广泛应用,使研究投入难以回报;二是研究成果难以得到实践的检验,使研究工作难以深入。

(3)重硬件,轻软件。地质实验测试资源共享程度低,实验室开放交流不够,部分仪器重复购置、开工不足造成资源浪费。对实验室信息管理系统的研究和应用推广缺乏重视,难以发挥新技术(具有海量数据处理能力)的应用潜力。

(4)重眼前,轻长远。对长期发展所需的基础性、前瞻性研究缺乏持续的支持,缺乏对用于前瞻性、创新性研究和易于出有显示度的大型仪器设备(如加速器质谱 AMS)引进工作的足够重视,导致前期研究与开发积累不足,难以摆脱不能为地质调查新领域及时提供高水平技术支撑的被动局面。设备的国产化率低下,新仪器开发严重不足;缺乏高集成度、多功能、高精度的现场分析测试仪器和技术。

(5)重任务,轻建设。对于科研单位,学科的发展是基础,需要几十年甚至几代人持之以恒的不懈努力,才能造就一个优势学科,造就一支本学科的优秀团队。目前,科技经费分布的不合理造成了学科的发展往往是跟着任务走,在一定程度上是任务决定学科。这种趋势将对科研工作的发展产生极为不利的影响。应当坚持以任务带动学科的发展,以学科的发展支撑重大的科技任务。

(6)地质实验测试标准化工作严重滞后。无论是地质实验技术规范的制定、地质标准样品的研制,还是标准方法(特别是新技术方法)的制(修)订都

难以满足地质科研和调查的需求。现有标准物质品种不全,定值项目和含量范围难以满足地质科研和地质调查的需要。绝大多数方法标准仍以传统的化学法为主,技术落后,标准水平低,明显落后于测试技术的发展。地质实验测试标准化研究的现状已直接影响地质科研和地质调查工作的质量和水平。

(7) 实验测试队伍的建设,特别是优秀科研团队的建设是最突出的问题。目前,我国实验测试队伍距离中央要求的人员精干、结构合理、装备精良、能承担重大任务的要求还存在很大差距。

4 我国地质分析测试技术的发展方向

国家地质工作的根本转变,实现了地质科学本身重大的转折。地学研究领域的拓宽无疑为地质实验测试技术的研究提出了挑战和提供了发展机遇。作者认为,优先支持重大领域或课题和加强关键地质实验测试技术与方法的研究,是进一步促进地质分析测试技术发展的重要方向。

4.1 优先支持重大领域或课题

优先支持的重大领域或课题体现在以下方面。

(1) 土地及生态环境地球化学调查实验测试体系的建立与完善。包括:① 土地及生态地球化学调查中重要重金属分析测试技术方法;② 土地及生态地球化学调查中形态、价态、有效态分析技术方法;③ 土地及生态地球化学调查中重要有机污染物和金属有机化合物分析测试技术方法研究;④ 土地及生态地球化学调查中生物样品的分析测试技术方法;⑤ 土地及生态地球化学调查中污染源示踪技术方法;⑥ 天然放射性(氡)潜势调查技术方法及技术、质量规范;⑦ 开展全国土壤污染调查有机污染物指标体系、技术方法和质量控制体系的建设;⑧ 生物地球化学分析与质量控制技术研究。

(2) 能源地质调查实验测试体系的建立与完善。包括:① 陆地油气地球化学勘探分析测试技术方法及其应用研究;② 建立以现代分析测试技术为主的煤炭分析测试体系;③ 建立油页岩、油岩等非常规能源重要组分的分析测试方法体系;④ 水域油气勘探分析测试技术方法研究;⑤ 进行油气资源的成油(气)时代,即物质来源测试技术方法研究。

(3) 非能源矿产资源调查实验测试体系的建立与完善。包括:① 进一步完善以现代分析测试技术为主的不同比例尺的化探、多目标调查实验测试体系;② 建立、完善以现代分析测试技术为主的重要金属与非金属矿产资源(矿石、单矿物)实验测试技术方法体系,如难度较大的硫化矿物中超痕量稀土元素分析、矿物中铂族元素原位分析等,矿石类样品的XRF快速分析方法的应用研究(如铜、铅、锌、钼、

钨矿石等);③ 建立与完善盐湖资源实验测试技术方法体系。

(4) 海洋地质调查实验测试体系的建立与完善。包括:① 海洋区域地质调查和综合地质调查中化学成分分析技术方法体系;② 重点海域和海岸带海洋环境地质调查评价分析测试技术方法体系;③ 建立、完善海域天然气水合物分析方法;④ 海洋油气分析测试技术方法;⑤ 海洋环境地质分析测试技术方法;⑥ 海洋生物样品分析测试技术方法;⑦ 海洋现场、原位、在线分析测试技术方法;⑧ 海水及海洋沉积物、环境地质样品和生物样品中挥发性苯系物、卤代烃、氯苯等有机污染物测定方法,海洋沉积物中持久性有机污染物分析。

(5) 地下水污染调查实验测试体系的建立与完善。包括:① 地下水污染调查现场检测技术,例如SPME-GC/MS用于地下水有机污染调查的现场快速筛选及现场分析设备与技术研究等;② 地下水污染调查无机多元素分析技术;③ 建立、完善地下水污染调查重要有机污染物分析技术与检测方法,包括地下水中挥发性苯系物、氯苯的测定,挥发性石油烃的测定,土壤中挥发性苯系物、氯苯、卤代烃的测定,挥发性石油烃的测定;④ 建立地下水中配套土壤指标检测方法和质量控制体系;⑤ 全国地下水污染调查有机污染物分析测试技术信息系统建设。

(6) 地质实验室基础性工作和测试标准化体系的建设。包括:① 地质实验测试紧缺标准物质的研制;② 地质实验测试有机、无机、微区、同位素分析标准方法(特别是近些年来新技术新方法的研究成果)的制(修)订;③ 地质实验测试技术、质量管理规范的制(修)订。

4.2 加强地质实验测试关键技术与方法的研究

(1) 同位素分析技术。包括:测年同位素实验测试技术(SHRIMP、AMS、MC-ICP-MS、 ^{14}C 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 测年技术);稳定同位素实验测试技术和有机地球化学同位素实验测试技术;气体同位素分析,全样分析(GB/IRMS分析碳酸岩中C、O、 H_2O 中H、O、 H_2O 中INC同位素),完善单体同位素分析测试技术体系,水、土、生物样品中有机化合物单体同位素分析及应用;与油气资源相关的黑色页岩、油页岩的Re-Os同位素体系研究;金属矿床成矿年代学及成矿物质来源研究测试技术。

(2) 有机地球化学分析测试技术。包括:能源(油气)有机地球化学分析测试新技术;生态环境(重要污染物)有机地球化学分析测试技术,如地下水样品中重要有机污染物分析测试技术方法,土壤样品中重要有机污染物分析测试技术方法,生物样品中重要有机污染物分析测试技术方法,土壤中挥

发性有机物测定方法,生物样品中挥发性有机物测定方法和海洋环境地质样品中有机污染物分析测试技术方法;现场、原位、在线分析技术;开展有关元素形态的分析方法研究和应用探索。

(3) 生态环境地球化学调查评价样品中元素形态分析测试技术。包括:元素顺序提取相态分析测试技术;金属有机化合物分析技术;价态分析技术;有效态分析技术;界面过程分析技术;金属-有机酸(腐殖酸)形态分析技术和常规有机污染物形态分析技术。

(4) 岩矿鉴定和物性分析技术及其应用方法研究。包括:电子探针分析技术;扫描、透射电子显微分析技术;拉曼光谱分析技术;X射线衍射分析技术;红外光谱分析等技术在岩矿鉴定及物性分析中的应用研究。

(5) 现代化、高集成度的野外现场快速分析测试技术。包括:现代化、高集成度的陆地现场快速分析测试技术方法(车载);现代化、高集成度的海洋现场快速分析测试技术方法(船载)。

(6) 微区与原位分析技术。包括:微区与原位化学成分分析测试技术方法,如地质样品(矿物、砂石、岩石)中熔融包体和液体包体中原位分析及 LA-ICP-MS 和 μ -XRF 技术等;微区与原位同位素分析测试技术方法和外星体样品分析技术研究。

(7) 高效、低成本、无(低)污染样品制备、化学成分分离富集与绿色分析技术。包括:测试样品粉碎粒度与取样量相关性应用基础理论的探索;高效、无(低)污染的样品前处理技术,如固相微萃取技术在地下水有机污染调查快速筛查中的应用和高效、无(低)污染的无机、有机成分现代分离富集技术。

(8) 具有自主知识产权的地质分析仪器设备研发的关键技术。包括:地质科研、地质调查急需的测试仪器设备及辅助装置的研制与开发;量大面广的进口分析测试仪器设备的改造技术;重要大型进口设备零备件的研制与开发技术;地质样品 CO_2 测定仪的研制及地质样品结晶水测定仪的研制;现场(陆地、海洋、手持)能量色散 XRF 光谱仪;偏振 XRF;微区 XRF 光谱仪;活体与生物地球化学 XRF 光谱仪;针对地调工作中有机地球化学分析测试需求,研制高效分离富集功能的液体样品前处理装置。

(9) 地质实验室信息管理系统(LIMS)和网络技术。包括:地质实验室信息管理系统(LIMS)开发与推广;地质实验室分析测试大型仪器设备和信息资源(包括成果)远程共享技术和 LIMS 后台数据库设计的规范化、数据库 E-R 图设计及优化。

(10) 现代生物地球化学分析技术及过程分析技术。

5 结语

地质实验测试技术研究工作已摆脱了 20 世纪 90 年代的低谷,正处于转折、上升的关键时期,发展是主流。主要反映在国家对地质和科技工作的重视,各方面投入的加大以及科技体制改革政策的逐步到位,极大地推动了地质实验测试科研工作。可以说,地质实验测试科研工作已实现了从求生存向求发展的过渡,已开始步入良性循环。地质实验测试部门应该抓住机遇,面对挑战,加快发展,为现代地球科学的发展提供重要的支撑。

致谢:在本文撰写过程中,中国地质科学院矿产资源研究所丁梯平研究员,中国地质科学院地质研究所朱祥坤研究员,国家地质实验测试中心李冰研究员、詹秀春研究员、屈文俊研究员、饶竹研究员、王亚平研究员、汪双清研究员、孙青研究员、江林高级工程师和胡明月助理研究员提供了重要资料,在此一并表示感谢。

6 参考文献

- [1] Abstract Proceedings of the 6th International Conference on the analysis of Geological and Environmental Materials [A]. Beijing: National Research Center for Geoanalysis, 2006.
- [2] 吴淑琪,罗立强,罗代洪. 第六届国际地质和环境材料分析大会概况[J]. 岩矿测试, 2006, 25(4): 391-396.
- [3] 叶家瑜,张蕾. 多目标地球化学勘查样品分析方法配套方案[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 741-744.
- [4] 张勤. 多目标地球化学填图中的 54 种指标配套分析方案和分析质量监控系统[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 292-297.
- [5] 于波,严志远,杨乐山,王瑞敏,李小莉. X 射线荧光光谱法测定土壤和水系沉积物中碳和氮等 36 个主次痕量元素[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 74-78.
- [6] 于兆水,胡外英,张勤. 多目标地球化学调查土壤样品中氮和碳的快速测定[J]. 岩矿测试, 2007, 26(3): 235-237.
- [7] 张学华,王君玉,韩敏. 氯胺 T-四碱催化分光光度法测定河南省黄淮平原农业地质调查样品中痕量碘[J]. 岩矿测试, 2007, 26(5): 391-394.
- [8] 朱英. 改进电极发射光谱法测定地球化学样品中 Ag、B、Sn[J]. 资源环境与工程, 2007(4): 489-491.
- [9] 郭振华,张立英. ICP-AES 法测定岩石、土壤和水系沉积物中 22 种元素[J]. 化工矿产地质, 2005, 27(4): 241-244.
- [10] 王龙山,郝辉,王光照,胡建平. 偏硼酸锂熔矿-超声提取-电感耦合等离子体发射光谱法测定岩石水系沉积物土壤样品中硅铝铁等 10 种元素[J]. 岩矿测试, 2008, 27(4): 287-290.
- [11] 温晓华,邵超英,张琢,何中发. 悬浮液进样-氢化

- 物发生原子荧光光谱法测定土壤中痕量砷锑硒[J]. 岩矿测试, 2007, 26(6): 460-464.
- [12] 侯振辉, 王晨香. 电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中35种微量元素[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(8): 940-944.
- [13] 李中玺, 周丽萍. 断续流动在线分离富集-蒸气发生原子荧光光谱法测定复杂环境样品中痕量镉[J]. 岩矿测试, 2006, 25(3): 233-238.
- [14] 李冰. 耦合等离子体质谱技术在地质调查中的应用研究[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 799-804.
- [15] 杨胜洪, 屈文俊, 杜安道, 杨刚, 陈江峰. 同位素稀释等离子体质谱法准确测定地质样品中痕量铀[J]. 岩矿测试, 2006, 25(2): 125-128.
- [16] 张雪梅, 张勤. 发射光谱法测定勘查地球化学样品中银锡钨钼铅[J]. 岩矿测试, 2006, 25(4): 323-326.
- [17] 林光西, 周泳德, 周康明. 泡沫塑料富集-石墨炉原子吸收光谱法测定地质样品中微量铊[J]. 岩矿测试, 2006, 25(4): 377-380.
- [18] 肖凡, 徐崇颖, 邢刚, 付爱瑞. 碘化钾-甲基异丁基甲酮萃取-火焰原子吸收分光光度法连续测定地球化学样品中痕量银镉铊[J]. 岩矿测试, 2007, 26(1): 67-70.
- [19] 王玉林, 孙爱琴, 姚文生, 王烨, 李艳华. 弱碱性阴离子树脂分离富集-发射光谱法测定痕量钡[J]. 岩矿测试, 2007, 26(5): 395-397.
- [20] 林光西. 氢化物发生-原子荧光光谱法直接测定地球化学样品中痕量砷[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 151-152.
- [21] 黄仁忠. 疏脉介质-石墨炉原子吸收光谱法测定化探样品中微量银[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 237-238.
- [22] 周丽萍, 李中玺. 王水提取-电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中微量银、镉、铋[J]. 分析试验室, 2005, 24(9): 20-25.
- [23] 何贵, 王禄军, 蒋修博. 火焰和石墨炉原子吸收法联用改善试金分析的检出限[J]. 四川地质学报, 2007, 27(3): 228-229.
- [24] 徐凤莲, 张静. 发射光谱法快速测定化探样品中痕量元素银、锡、钼的方法研究[J]. 新疆有色金属, 2005(S1): 41-43.
- [25] 王锐, 袁惠霞, 郭玉翠. 氢化原子荧光法测定化探样品中的铋[J]. 青海国土经略, 2007(1): 44-45.
- [26] 李锐. 聚氨酯泡沫塑料富集-ICP-MS测定化探样品中微量金的方法[J]. 化工矿产地质, 2007(4): 242-244.
- [27] 李刚, 曹小燕. 电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中锆和镉的干扰及校正. 岩矿测试, 2008, 27(3): 197-200.
- [28] 胡明月, 何红蓼. 同位素稀释-ICP-MS法测定地质标准物质中铂族元素[J]. 质谱学报, 2005, 26(增刊): 9-10.
- [29] 龚迎莉, 汪汉清, 沈斌. 电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定沉积岩中15个元素[J]. 岩矿测试, 2007, 26(3): 230-232.
- [30] 石贵勇, 孙晓明, 屈文俊, 薛婷, 张美, 熊德信, 王生伟. 铈镧试金富集-等离子体质谱法测定西太平洋富钴结壳中的铂族元素[J]. 岩矿测试, 2007, 26(2): 113-116.
- [31] 何文杰, 杨啸涛. 流动注射在线置换吸附预富集与火焰原子吸收联用分析地质样品中痕量银[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 197-200.
- [32] 范凡. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定地球化学样品中痕量砷[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 225-228.
- [33] 陈永君, 邓赛文, 董德凡, 郑妙子. 钕钪磁铁矿样品主、次元素的快速分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(12): 2085-2087.
- [34] 漆亮, 周美夫, 严再飞, 皮道会, 胡静. 改进的卡洛斯特管溶样等离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铋的含量[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 667-674.
- [35] 何红蓼, 李冰, 韩丽荣, 孙德忠, 王淑贤, 李松. 封闭压力酸溶-ICP-MS法分析地质样品中47个元素的评价[J]. 分析试验室, 2002, 21(5): 8-12.
- [36] 王蕾, 何红蓼, 李冰. 碱熔沉淀-等离子体质谱法测定地质样品中的多元素[J]. 岩矿测试, 2003, 22(3): 86-92.
- [37] 李晓红. 原子荧光光谱法测定化探样品中砷锑铋汞[J]. 理化检验: 化学分册, 1999, 35(3): 119-120, 123.
- [38] 刘先国, 方金东, 胡圣虹, 高山. 氢化物发生电感耦合等离子体发射光谱测定土壤样品中痕量砷锑铋[J]. 分析试验室, 2002, 21(6): 14-17.
- [39] 何红蓼, 胡明月, 巩爱华, 温宏利, 阙松娇. 碘化物升华分离-电感耦合等离子体光谱法测定土壤和沉积物中砷、锑、铋、镉、锡[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(3): 663-666.
- [40] 韩丽荣, 李冰, 马新荣. 乙醇增强-电感耦合等离子体质谱法直接测定地质样品中砷[J]. 岩矿测试, 2003, 22(2): 98-102.
- [41] 李冰, 马新荣, 杨红霞, 何红蓼. 封闭酸溶-电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定地质样品中砷、锑、铋[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 241-247.
- [42] 李冰, 何红蓼, 史世云, 马新荣, 温宏利, 吕彩芬. 电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中痕量碘溴砷的研究 I. 不同介质及不同阴离子形态对测定信号的影响[J]. 岩矿测试, 2001, 20(3): 161-166.
- [43] 李冰, 何红蓼, 史世云, 马新荣, 温宏利, 吕彩芬. 电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中痕量碘溴砷的研究 II. 土壤及沉积物标准物质分析[J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 241-246.
- [44] 马生凤, 温宏利, 巩爱华, 孙德忠. 大试管回流消解-等离子体发射光谱/质谱法测定植物样品中多元素[J]. 岩矿测试, 2007, 26(3): 183-187.
- [45] 马生凤, 孙德忠, 巩爱华, 孙红宾. 大管回流消解 ICP-MS 测定植物样品中的 Hg 及其他痕量元素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(2): 136-140.
- [46] 杨红霞, 李冰, 马新荣. 电感耦合等离子质谱法测定

- 血液和精液中的硼[J]. 分析试验室, 2005, 24(10): 80-83.
- [47] 黄光明, 窦银萍, 张静梅, 张培新, 高孝礼. 电感耦合等离子体质谱法同时测定地下水中碘溴碘[J]. 岩矿测试, 2008, 27(1): 25-28.
- [48] 汪雨. 高分辨连续光源原子吸收光谱仪检测饮用矿泉水中的金属离子[J]. 岩矿测试, 2007, 26(6): 485-489.
- [49] 邵文军, 姜莹, 付国民. 饮用天然矿泉水中锆的测定[J]. 饮料工业, 2005, 8(4): 47-48.
- [50] 邵文军, 杨威, 单晓莹. 饮用天然矿泉水中硒的测定[J]. 饮料工业, 2005, 8(5): 45-46.
- [51] Zhan Xiu-chun. Application of polarized EDXRF in geo-chemical sample analysis and comparison with WDXRF[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2005, 34(3): 207-212.
- [52] 樊兴涛, 詹秀春, 巩爱华. 偏振激发-能量色散X射线荧光光谱法测定卤水中主量元素硫氯钾钙[J]. 岩矿测试, 2007, 26(2): 109-112.
- [53] Zhan Xiuchun, Luo Liqiang, Fan Xingtao. Spatial XRF distribution characteristics associated with polarized EDXRF spectrometry[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2007, 36: 275-278.
- [54] Xu Hong-zhi, Hu Sheng-hong, Hu Zhao-chu, Jiang Jin-feng, Wang Xiao-hong. Element distribution in cobalt-rich crust profile by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35(8): 1099-1104.
- [55] 第五春荣, 柳小明, 袁洪林, 林慈奎, 王建其. 193 nm ArF 准分子激光剥蚀等离子体质谱法测定熔融玻璃中微量铟和钽[J]. 岩矿测试, 2007, 26(1): 1-3.
- [56] 胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 樊兴涛, 王广, 贾泽荣. 基体归一定量技术在激光烧蚀-等离子体质谱法钻石原位多元素分析中的应用[J]. 分析化学, 2008, 36(7): 947-953.
- [57] 王亚平, 黄毅, 王苏明, 许春雪, 刘妹. 土壤和沉积物中元素的化学形态及其顺序提取法[J]. 地质通报, 2005, 24(8): 728-734.
- [58] 何红蓼, 李冰, 杨红霞, 倪哲明. 环境样品中痕量元素的化学形态分析 I. 分析技术在化学形态分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2005, 24(1): 51-58.
- [59] 何红蓼, 倪哲明, 李冰, 杨红霞. 环境样品中痕量元素的化学形态分析 II. 汞铈镉锡铅铬的形态分析[J]. 岩矿测试, 2005, 24(2): 118-128.
- [60] 徐国栋, 邱海鸿, 王义壮, 汤志勇. 原子荧光光谱法用于水系沉积物中迁移毒性汞的形态分析[J]. 岩矿测试, 2007, 26(5): 359-362.
- [61] 刘文长, 马玲, 刘洪青, 潘同应, 徐厚玲. 生态地球化学土壤样品元素形态分析方法研究[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 181-188.
- [62] 张静, 刘晓端, 江林. 土壤中不同形态砷的分析方法[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 179-183.
- [63] 刘晓端, 徐清, 葛晓立, 刘浏, 武佃卫. 密云水库沉积物中金属元素形态分析研究[J]. 中国科学: D 辑, 2005(增刊1): 288-295.
- [64] 周康民, 汤志云, 黄光明, 肖灵, 江冶, 高孝礼. 土壤中重金属形态分析方法研究[J]. 江苏地质, 2007, 31(3): 165-175.
- [65] 管凌飞, 范必威, 周莉. 生物样品中硒的测定方法及形态分析研究进展[J]. 广州化学, 2006, 31(4): 61-67.
- [66] 刘威, 杨红霞, 李冰, 陈登云, 张惠娟. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱测定地下水中碘形态稳定性[J]. 分析化学, 2007, 35(4): 571-574.
- [67] Yang Hongxia, Liu Wei, Li Bing, Zhang Huijuan, Liu Xiaoduan, Chen Dengyun. Speciation analysis for iodine in groundwater using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry (HPLC-ICP-MS)[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2007, 31(4): 345-351.
- [68] 刘威, 杨红霞, 李冰. 碘分析方法研究进展[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 127-136.
- [69] 杨红霞, 刘威, 李冰. 碱消解-高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定生物样品中的甲基汞和乙基汞[J]. 岩矿测试, 2008, 27(6): 63-66.
- [70] 张月琴, 李松, 王健, 李迎春, 张保科. 多组分地质气样的气相色谱分析[J]. 分析测试学报, 2005, 24(2): 63-66.
- [71] 饶竹, 李松, 佟柏龄, 吴淑琪, 李迎春. 顶空气相色谱法测定地层水中的苯系物[J]. 岩矿测试, 2004, 23(2): 97-102.
- [72] 饶竹, 李松, 张桃英. 水中石油类有机污染物的定性分析[J]. 分析测试学报, 2005, 24(增刊): 205-206.
- [73] 张月琴, 吴淑琪, 张淑芳, 张媛. 以苯类化合物表征固相萃取纤维头的萃取特征[J]. 岩矿测试, 2005, 24(2): 97-101.
- [74] 张月琴, 吴淑琪, 张淑芳. 吹扫捕集-气相色谱法测定水中七种氯苯类化合物[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 189-192.
- [75] 汪雨, 支辛辛, 张玲金, 谢文明. 固相膜萃取测定水中的有机氯农药[J]. 分析测试学报, 2005, 24(增刊): 199-200.
- [76] 汪雨, 张玲金. 常压微波萃取土壤中有有机氯农药[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 15-18.
- [77] 汪雨, 支辛辛, 张玲金, 杨永亮. C_{18} 固相膜萃取-气相色谱法测定饮用水中 12 种有机氯农药[J]. 岩矿测试, 2006, 25(4): 301-305.
- [78] 支辛辛, 汪雨, 张玲金. 利用炭石灰固相萃取测定水中的有机氯农药[J]. 分析测试学报, 2006, 25(5): 30-32, 37.
- [79] 江奎, 汪雨, 支辛辛, 杨永亮, 张玲金. 加速溶剂萃取/GC-ECD 分析土壤中多氯联苯的研究[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2006, 21(1): 18-22.
- [80] 宋淑玲, 李重九, 饶竹. 蔬菜农药多残留检测中主要干扰物的研究[J]. 分析测试学报, 2007, 26(增刊): 215-217.
- [81] 饶竹, 李松, 何森, 苏劲. 高效液相色谱-荧光-紫外串联测定土壤中 16 种多环芳烃[J]. 分析化学, 2007, 35(7): 954-958.

- [82] 佟玲, 黄园英, 张玲金, 吴淑琪. 土壤中持久性有机污染物分析的前处理方法[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 81-86.
- [83] 王玮亚, 饶竹. 大口径毛细管柱气相色谱法测定水中15种有机磷农药[J]. 岩矿测试, 2007, 26(1): 17-20.
- [84] 黄毅, 饶竹, 王超. 吹扫捕集气相色谱-质谱法定性分析人尿中挥发性有机物[J]. 分析测试学报, 2007, 26(增刊): 64-66.
- [85] 何森, 饶竹, 苏劲, 黄毅. GDX-502树脂富集高效液相色谱法测定地表水中酚类化合物[J]. 岩矿测试, 2007, 26(2): 101-104.
- [86] 何森, 饶竹. 圆盘固相萃取富集-气相色谱法测定地表水中有机氯和有机磷农药[J]. 岩矿测试, 2008, 27(1): 12-16.
- [87] 李松, 饶竹, 宋淑玲. 全国地下水调查中12种半挥发性性必检组分的测定[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 91-94.
- [88] 沈斌, 汪双清, 龚迎莉, 孙玮琳. 自然水体和土壤中氯代烃和芳香烃类化合物分析测试方法研究[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3): 174-178.
- [89] 饶竹, 王亚平, 李松, 祁鹏. 海洋沉积物中吸附态轻烃的气相色谱分析[J]. 岩矿测试, 2004, 23(4): 256-259.
- [90] 饶竹, 罗立强, 方家虎, 詹秀春, 杨柳, 苏劲. 中国大陆科学钻探工程主孔0-2000米超高压变质岩中有机质的检出及成因研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 2060-2066.
- [91] 饶竹, 杨柳, 罗立强, 詹秀春, 方家虎. 大陆深钻超高压变质岩中可溶有机质提取研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(3): 257-260.
- [92] 汪双清, 孙玮琳. 油气地球化学勘查中的分析测试技术和方法[J]. 岩矿测试, 2005, 24(4): 271-276.
- [93] 秦建中, 钱志浩, 曹寅, 张美珍. 油气地球化学新技术新方法[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 519-528.
- [94] 王强, 付晓文, 徐志明, 胡守志, 胡雄. 稳定碳同位素在油气地球化学中的应用及存在的问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 233-237.
- [95] Yang Gang, Du Andao, LU Jiren, Qu Wenjun, Chen Jiangfeng. Re-Os (ICP-MS) dating of the massive sulfide ores from the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2005, 48(10): 1672-1677.
- [96] Wang Denghong, Qu Wenjun, Li Zhiwei, Yin Hanlong, Chen Yuchuan. Mineralization episode of porphyry copper deposits in the Jinshajiang-Red River mineralization belt: Re-Os dating[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2005, 48(2): 192-198.
- [97] Fu Yazhou, Peng Jinatang, Qu Wenjun, Hu Ruizhong, Shi Xuefa, Du Andao. Os isotopic composition of a cobalt-rich ferromanganese crust profile in Central Pacific[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 2106-2112.
- [98] Yu Gang, Yang Gang, Chen Jiangfeng, Qu Wenjun, Du Andao, He Wei. Re-Os dating of the Maoling gold deposit, Liaoning Province, China and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(14): 1509-1514.
- [99] Zhang Lianchang, Xiao Wenjiao, Qin Kezhang, Qu Wenjun, Du Andao. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 960-969.
- [100] 屈文俊, 杜安道. 铜镍硫化物的 Re-Os 同位素定年方法及应用实例[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊): 140-142.
- [101] 杜安道, 杨刚, 屈文俊, 陈江峰, 杨胜洪. Pt-Os 同位素系统定年方法研究[J]. 质谱学报, 2005, 26(增刊): 57-58.
- [102] 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 屈文俊, 陈江峰. 金川镍-铜-铂矿床硫化物矿石的 Re-Os (ICP-MS) 定年[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(3): 241-245.
- [103] 符亚洲, 彭建堂, 屈文俊, 胡瑞忠, 石学法, 杜安道. 中太平洋富钴结壳剖面的钨同位素组成[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1654-1659.
- [104] 陈世平, 王登红, 屈文俊, 陈郑辉, 高晓理. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 230-233.
- [105] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 张招崇, 闫升好, 杨建民, 屈文俊, 王志良. 新疆克拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4): 285-293.
- [106] 喻刚, 杨刚, 陈江峰, 屈文俊, 杜安道, 何畏. 辽东猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1248-1252.
- [107] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 谢智. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 172-175.
- [108] 梅燕雄, 毛景文, 李进文, 杜安道. 安徽铜陵大团山铜矿床层状矽卡岩矿体中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其地质意义[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 327-331.
- [109] 王登红, 李华芹, 陈毓川, 屈文俊, 梁婷, 应立娟, 韦可利, 刘孟宏. 桂西北南丹地区大厂超大型锡多金属矿床中发现高稀土元素方解石[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 176-180.
- [110] Zhang Z H, Mao J W, Du A D, Yang J M. Re-Os dating of the two major Cu-Ni deposits in Northern Xinjiang [J]. *China. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(18): A738.
- [111] Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann Bernd, Yu Jinjie, Du Andao, Mei Yanxiong, Li Yongfeng, Zang Wenshuan, Stein Holly J, Zhou Taofa. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 307-324.
- [112] 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 2006, 25(3): 263-268.

- [113] 李月臣,赵国春,屈文俊,潘成泽,毛启贵,杜安道. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re - Os 同位素测定[J]. 岩石学报,2006,22(1):245 - 251.
- [114] 丰成友,张德全,屈文俊,杜安道,李大新,余宏全. 青海格尔木骆驼沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re - Os 定年[J]. 地质学报,2006,80(4):571 - 576.
- [115] 陈郑辉,王登红,屈文俊,陈毓川,王平安,许建祥,张家菁,许敏林. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代[J]. 地质通报,2006,25(4):496 - 501.
- [116] 陶琰,胡瑞忠,杜安道,屈文俊,冯家毅,马言胜. 云南金宝山铂钨矿 Nd - Os 同位素特征及成因意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2006,25(增刊):127 - 128.
- [117] 应立娟,王登红,梁婷,周汝洪,马军,屈文俊,陈振宇. 新疆阿尔泰乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿的化学成分类型特征和地质意义[J]. 矿物学报,2006,26(2):59 - 68.
- [118] 谢桂青,毛景文,李瑞玲,张祖送,赵维超,屈文俊,赵财胜,魏世昆. 鄂东南地 Cu - Au - Mo - (W) 矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨:辉钨矿 Re - Os 同位素年龄[J]. 矿床地质,2006,25(1):43 - 52.
- [119] Xie G Q, Mao J W, Li R L, Qu W J, Pirajno F, Du A D. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo(W) deposits in southeastern Hubei, China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 90(3):249 - 270.
- [120] 聂凤军,张万益,杜安道,江思宏,刘妍. 内蒙古小东沟斑岩型钨矿床辉钨矿 Re - Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报,2007,81(7):898 - 905.
- [121] 代军治,毛景文,杜安道,谢桂青,白杰,杨富全,屈文俊. 江西肖家营子钨(铁)矿床 Re - Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2007,81(7):917 - 923.
- [122] 聂凤军,张万益,杜安道,江思宏,刘妍. 内蒙古朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床辉钨矿 Re - Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报,2007,28(4):315 - 323.
- [123] 陈懋弘,毛景文,屈文俊,吴六灵,Phillip J UTTLEY, Tony NORMAN,郑建民,秦运忠. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re - Os 同位素测年及地质意义[J]. 地质评论,2007,53(3):371 - 382.
- [124] 马丽艳,路远发,屈文俊,付建明. 湖南黄沙坪铅锌多金属矿床的 Re - Os 同位素等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,2007,26(4):425 - 431.
- [125] 姚军明,华仁民,屈文俊,戚华文,林锦富,杜安道. 湖南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钨矿的 Re - Os 同位素定年及其意义[J]. 中国科学:D 辑,2007,37(4):471 - 477.
- [126] 杨胜洪,陈江峰,屈文俊,杨刚,杜安道. 金川铜镍硫化物矿床的 Re - Os “年龄”及其意义[J]. 地球化学,2007,36(1):27 - 36.
- [127] 孟祥金,侯增谦,董光裕,刘建光,屈文俊,杨竹森,左力艳,万禄进,肖茂章. 江西金溪熊家山钨矿床特征及其 Re - Os 年龄[J]. 地质学报,2007,81(7):946 - 951.
- [128] 丰成友,许建祥,曾载淋,张德全,屈文俊,余宏全,李进文,李大新,杜安道,董英君. 赣南天门山 - 红桃岭钨锡矿田成岩成矿时代精细测定及其地质意义[J]. 地质学报,2007,81(7):952 - 963.
- [129] 孙晓明,石贵勇,熊德信,王生伟,翟伟,屈文俊,杜安道. 云南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和 Re - Os 同位素地球化学及其矿床成因意义[J]. 地质学报,2007,81(3):112 - 122.
- [130] 李进文,李旭辉,裴荣富,梅燕雄,王永磊,屈文俊,黄修保,臧文栓. 江西武山铜矿南矿带辉钨矿 Re - Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2007,81(6):801 - 807.
- [131] 李厚民,叶会寿,毛景文,王登红,陈毓川,屈文俊,杜安道. 小秦岭金(钨)矿床辉钨矿 Re - Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,2007,26(4):417 - 424.
- [132] 朱祥坤,李志红,赵新苗,唐索寒,何学贤, Belshaw Nick S. 铁同位素的 MC - ICPMS 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.
- [133] 朱祥坤,何学贤,杨淳. Mg 同位素标准参考物质 SRM980 的同位素不均一性研究[J]. 地球学报,2005,26(增刊):12 - 14.
- [134] 唐索寒,朱祥坤,李津,闫斌. 地质样品铜铁锌同位素标准物质研制[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(4):273 - 284.
- [135] 唐索寒,朱祥坤. AG MP - 1 阴离子树脂元素分离方法研究[J]. 高校地质学报,2006,12(3):398 - 403.
- [136] 唐索寒,朱祥坤,蔡俊军,李世珍,何学贤,王进辉. 用于多接收器等离子体质谱铜铁锌同位素测定的离子交换分离方法[J]. 岩矿测试,2006,25(1):5 - 8.
- [137] 何学贤,朱祥坤,李世珍,唐索寒. 多接收器等离子体质谱(MC - ICPMS)测定 Mg 同位素方法研究[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(5):441 - 448.
- [138] 李世珍,朱祥坤,唐索寒,何学贤,蔡俊军. 多接收器等离子体质谱法 Zn 同位素比值的高精度测定[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(4):273 - 278.
- [139] 李世珍,朱祥坤,何学贤,杨淳,赵新苗,唐索寒. 用于多接收器等离子质谱 Mg 同位素测定的分离方法研究[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(5):450 - 456.
- [140] 蔡俊军,朱祥坤,唐索寒,李世珍,何学贤. 多接收电感耦合等离子体质谱 Cu 同位素测定中的干扰评估[J]. 高校地质学报,2006,12(3):392 - 397.
- [141] 李志红,朱祥坤,唐索寒,李延河. 绿片岩 - 低角闪岩相变质条件下磁铁矿与黄铁矿间的 Fe 同位素分馏[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(4):291 - 297.
- [142] 李津,朱祥坤,唐索寒. 低温环境下铜同位素分馏的若干重要过程[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(4):298 - 315.
- [143] 李津,朱祥坤,唐索寒. 低温环境下铁同位素分馏的若干重要过程[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(4):305 - 316.
- [144] 李津,朱祥坤,唐索寒. 低温环境下 Zn 同位素分馏的若干重要过程[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27(5):466 - 471.
- [145] 朱祥坤,李志红,唐索寒,李延河. 早前寒武纪硫铁矿矿床 Fe 同位素特征及其地质意义——以山东石河庄和河北大川为例[J]. 岩石矿物学杂志,2008,27

- (5):429-434.
- [146] 李志红,朱祥坤,唐索寒.鞍山一本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示[J].岩石矿物学杂志,2008,27(4):285-290.
- [147] 朱建明,Johnson Thomas M,罗泰义,朱祥坤.贵州遵义牛蹄塘组黑色岩系的硒同位素变化及其环境指示初探[J].岩石矿物学杂志,2008,27(4):361-366.
- [148] 宋柳霆,刘丛强,王中良,朱祥坤,唐索寒,李津,梁莉莉.贵州阿哈湖物质循环过程中的铁同位素地球化学及其指示意义[J].岩石矿物学杂志,2008,27(4):317-325.
- [149] 梁莉莉,刘丛强,王中良,朱祥坤,宋柳霆,李津.喀斯特高原湖泊生物地球化学过程中的锌同位素特征[J].岩石矿物学杂志,2008,27(4):326-334.
- [150] Ding T P, Ma G R, Shui M X, Wan D F, Li R H. Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang province, China [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 41-50.
- [151] Ding T P, Ma G R, Tian S H, Gao J F. Effect of rice growth on geochemical circle of silicon: Silicon isotope study on rice plants grew in field and laboratory [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(10): A551.
- [152] Ding T, Wan D, Bai R, Zhang Z, Shen Y, Meng R. Silicon isotope abundance ratios and atomic weights of NBS-28 and other reference materials [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69(23): 5487-5494.
- [153] Ding T, Tian S, Gao J. Silicon isotope compositions of the underground water, limestone and soil from karst caves in Guilin city, Guangxi, China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71(15S): A225.
- [154] Ding T P, Zhou J X, Wan D F, Chen Z Y, Wang C Y, Zhang F. Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72(5): 1381-1395.
- [155] 孙青,王晓华,石丽明,刘美美,储国强. GasBench II-IRMS 水平衡氢氧同位素分析方法研究[J].岩矿测试,2009,28(1):1-4.
- [156] 孙青,李圣强,罗立强,詹秀春. CCSD 主孔流体地球化学异常与超远震的关系[J].岩石学报,2005,21(5):1501-1507.
- [157] 孙青,李圣强,罗立强. CCSD 主孔地下流体特征与地震活动关系初步研究[J].地震,2005,25(1):15-21.
- [158] 李圣强,孙青,罗立强,詹秀春. CCSD 主孔流体异常及其附近 2 次 ML3.9 级地震的关系[J].中国地质,2005,32(2):330-335.
- [159] 詹秀春,罗立强,李迎春,唐力君,李东.关于 CCSD 主孔 4820-4930m 井段气体异常的初步解释[J].中国地质,2005,32(2):320-329.
- [160] 李迎春,张月琴,张保科,唐力君.钻井泥浆样品现场高效液相色谱分析——冷冻与失水两种前处理方法的讨论[J].岩矿测试,2005,24(4):241-244.
- [161] 詹秀春,罗立强,李迎春,唐力君,李东.中国大陆科学钻探主孔 4906 米附近氮气体异常的解析[J].岩矿测试,2006,25(1):1-4.
- [162] 唐力君,李迎春,王健,张保科,李松.中国大陆科学钻探工程现场实验室采样及样品处理方法探讨[J].中国地质,2006,33(5):1174-1179.
- [163] 何红蓼,孙德忠.封闭酸溶-ICP-MS 分析超细地质样品的条件优化[J].质谱学报,2005,26(增刊):23-24.
- [164] 孙德忠,何红蓼.样品粒度对封闭酸溶-ICP-MS 分析性能的影响[J].质谱学报,2005,26(增刊):21-22.
- [165] 王晓红,高玉淑,王毅民.超细地质标准物质及其应用[J].自然科学进展,2006,16(3):309-315.
- [166] 王晓红,王毅民,高玉淑,张学华,何红蓼.地质标准物质的粒度测量与表征实践[J].岩矿测试,2009,28(1):5-9.
- [167] 孙德忠,何红蓼.封闭酸溶-等离子体质谱法分析超细粒度地质样品中 42 个元素[J].岩矿测试,2007,26(1):21-25.
- [168] 甘露,吴晓军,吴淑琪,应志春.地质矿产分析测试元数据库管理系统[J].理化检验:化学分册,2005,41(增刊):55-56.
- [169] 甘露,吴晓军,吴淑琪,邓赛文.地质矿产分析测试元数据标准研究[J].现代科学仪器,2006(2):64-66.
- [170] 吴晓军,甘露,吴淑琪,邓赛文.地质矿产实验室分析测试元数据管理软件系统[J].岩矿测试,2006,25(4):369-372.
- [171] 王毅民,高玉淑,王晓红.中国地质标准物质研制和标准方法制定的成果与思考[J].岩矿测试,2006,25(1):55-63.
- [172] 王毅民,高玉淑,王晓红,沈恒培,王振宇.中国陆架沉积物标准物质研制[J].分析测试学报,2007,26(1):1-7.
- [173] 王毅民,高玉淑,王晓红,张学华,赵宏樵,刘淑琴,Andreev S I. 海山富钴壳标准物质研制[J].海洋学报,2007,29(2):82-91.
- [174] 邓赛文,刘洋,应志春,甘露,吴晓军.单道扫描型 X 射线荧光应用分析系统[J].现代仪器,2007,13(72):35.
- [175] 邓赛文,吴晓军,甘露,应志春,梁国立,崔长安,朱纪夏.多通道波长色散 X 射线荧光光谱仪的升级改造[J].岩矿测试,2007,26(6):481-484.
- [176] 邓赛文,应志春,甘露,吴晓军,梁国立. X 射线荧光光谱仪软件系统的升级改造[J].现代科学仪器,2007(5):51-53.
- [177] 江林,裴晓华,陈志新,那星.一种新型功率连续可调微波消解装置的研制[J].岩矿测试,2007,26(2):153-157.
- [178] 任家富,周建斌,庾先国,林娟,穆克亮. EDXRF-1024 便携式高精度 X 荧光分析仪[J].核技术,2006,29(9):698-670.