

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.013

西北地区地质实验测试技术研究进展 及其在地质调查中的应用

程秀花,李艳广,叶美芳,张明祖,黎卫亮,李忠煜,韩延兵,汪双双

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,陕西 西安 710054)

摘 要:地质调查工作覆盖了基础地质研究、矿产资源及能源勘查开发、生态环境保护、地质灾害防治减灾等多个业务领域。在中国西北地区,地质调查工作在找矿会战、西部大开发、国家能源安全建设、国土资源大调查和生态文明建设等国家战略实施过程中发挥了重要作用,而实验测试作为地质调查工作的“眼睛”,其重要性不言而喻。笔者介绍了地质实验测试技术国内外发展现状,回顾了中国西北地区地质实验测试工作的发展历史,分析了地质实验技术发展现状和主要特点,阐述了实验测试在中国西北地区地质调查工作不同历史时期,尤其是最近十年以来西北地区地质实验测试技术的研究进展,及其在基础地质调查、固体矿产资源调查、油气能源地质调查、水文地质与地下水污染调查和土壤生态地球化学调查等领域的应用,分析了新发展阶段关键性矿产调查以及健康地质、生态文明建设、黄河流域高质量发展等战略对实验测试技术的新需求,对未来地质实验工作方向和重点进行了展望。

关键词:西北地区;地质调查;实验测试技术;研究进展

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)03-0170-21

Progress in the Research on Geochemical Analytic Technique and Its Application in Geological Survey in Northwest China

CHENG Xiuhua, LI Yanguang, YE Meifang, ZHANG Mingzu, LI Weiliang,
LI Zhongyu, HAN Yanbing, WANG Shuangshuang

(Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shannxi, China)

Abstract: Geological survey has played a prominent role in the implementation of Chinese national strategies such as ore prospecting in Northwest China, development of the west region, national energy security construction, land and resources survey and ecological civilization construction. As the “eye” of geological survey, the importance of analytic technique is self-evident. First, we introduced the development of geochemical analytic technique in China and abroad, reviewed the development history of geochemical analytic technique in Northwest China, and discussed the status and main characteristics of geochemical analytic technique. We then expounded the progress of geochemical analytic technique in Northwest China in different historical periods especially in

收稿日期:2022-01-20;修回日期:2022-04-26;网络发表日期:2022-08-15;责任编辑:姜寒冰

基金项目:中国地质调查局项目“黄河中上游生态地质调查”(DD20221774)资助成果。

作者简介:程秀花(1979-),女,正高级工程师,主要从事岩石矿物化学分析研究。E-mail:20198905@qq.com。

the past decade, and its application in the fields of geological survey, solid mineral resources survey, oil and gas energy geological survey, hydrogeology and groundwater pollution survey and soil ecological geochemical survey. We also discussed the needs and challenges of geochemical analytic technique in the field of strategic mineral survey, health geology, the construction of ecological civilization and the high-quality development of the Yellow River Basin in the new development stage, and finally prospected the direction and top priority of Geochemical analytic technique in the future.

Keywords: Northwest China; geological survey; analytic technique; progress

李四光先生在中国地质矿产部成立之初曾指出:地质、勘探、化验三足鼎立,三分天下,各有其一,精辟地阐明了地质实验工作的作用和地位。早期全国化验技术人员只有 20 人(吴淑琪,2013),经过近 70 年的发展,从业人员已经增长到几万人,形成了以中国地质调查局、中国煤田地质总局、中国冶金地质总局、中国有色矿业集团、中国核工业集团、中国黄金集团以及各省局地质实验室、高校和中科院地质相关专业实验室为主体,以第三方检测实验室为补充的全国地质实验室架构。发展过程中,地质行业相继成立了一批国家级、省部级重点实验室和 49 个矿产资源监督检测中心(原国土资源部)。几十年来,地质实验测试工作在国家找矿会战、西部大开发、国家能源安全建设、国土资源大调查和生态文明建设等国家战略实施过程中发挥了重要作用,相继支撑了全国勘查地球化学填图、全国农业地质调查(多目标地球化学调查)、全国地下水污染调查、全国矿产资源潜力评价等多个重大项目,在基础地质调查、矿产资源调查、油气能源地质调查、水文地质与地下水污染调查和土壤生态地球化学调查等领域均作出了卓越贡献。在中国地质调查局西安地质调查中心成立 60 周年之际,笔者系统梳理了中国西北地区地质实验测试工作的发展历史、现状和特点,阐述了在不同历史时期,尤其是中国地质调查局成立以来,西北地区地质实验测试技术研究进展及其对地质调查工作的支撑作用,简要分析了新发展阶段地质调查工作对实验测试的新需求,最后对未来地质实验测试工作的发展方向和工作重点进行了展望。

1 地质实验测试技术发展现状

1.1 无机元素分析技术

中国地质实验测试工作起源于 1952 年,主要功

能与定位是服务于地质找矿,其中地质样品的无机元素分析是传统地质分析的最基本内容。20 世纪后 50 年,国内外地质实验测试无机元素分析技术主要有传统的容量法、比色法、重量法、极谱法以及原子吸收和原子荧光等。分析元素单一,前处理时间长,对分析人员技术水平要求高。进入 21 世纪,实验测试功能与定位已发展到要求全面支撑中国资源、能源、环境和地学前缘科学研究。无机元素测试技术发展经历了 3 个发展阶段:

(1)常规化学分析技术。为满足地质找矿对基础数据的需求,地质实验测试人员通过大量试验研究,建立了各种元素分析测试方法体系,以这些方法为基础,1959 年,在陈四箴(1959)先生的主持下出版了地质测试领域第一部专业工具书《矿物原料分析》。该阶段的分析技术主要以经典的容量法、重量法、比色法、极谱法为主,检测项目多以成矿元素、岩石全分析为主要内容,方法技术体系完善,在当时条件下具有很强的实用性。这些分析技术对人员专业素质要求较高,相对分析效率低、劳动强度大,多以常量、主量、成矿元素分析为主。

(2)痕量元素分析技术发展。20 世纪 70 年代,地质实验室致力于痕量元素分析技术研究。陈四箴(1978)先生率领团队研发了催化动力学分析方法,姚修仁(1981)先生研究了催化极谱分析方法,从此开启了痕量、超痕量元素分析时代。随后原子吸收光谱技术将地质实验测试领域的痕量分析带入了灵敏度高、准确性好、分析速度快的仪器分析阶段。

(3)大型仪器分析技术快速发展。随着 X 荧光光谱仪(XRF)、等离子体发射光谱仪(ICP-AES)、等离子体质谱仪(ICP-MS)等现代大型仪器的引进,地质实验测试技术发生了质的飞跃。此过程中建立了一系列的技术方法,主要包括:以 XRF、ICP-AES、ICP-MS 为主的 1:20 万区域化探样品分析配套方

法、多目标地球化学样品 54 个元素分析方法技术体系(张勤,2004)、勘查地球化学样品 76 个元素分析方法配套体系(叶家喻等,2004)。另外,技术人员依托 ICP-MS 仪器开发了稀土元素、分散元素、非金属元素和痕量、超痕量元素等一系列分析方法,并在地质调查工作中得到广泛应用(程秀花等,2013;孙朝阳,2016)。

随着地质工作的转型升级发展,实验测试工作也发生了相应的转变。配合生态环境地球化学调查与评价,开展了土壤、水、生物样品中无机元素的分析方法体系的研究,包括无机元素分析、价态分析、有效态以及形态分析,建立气相色谱、高效液相色谱与 ICP-MS 联用分析方法(屈文俊,2012)。此外,包括电子探针、激光剥蚀-等离子体质谱联用、离子探针技术等为主的原位微区元素分析技术已经成为了国内外重要的研究领域(刘勇胜,2021);野外现场快速分析技术方法的开发和完善也是地质实验测试技术发展的重要方向之一。

1.2 有机组分分析技术

20 世纪末以来,为更好地支撑地调科研新需求,地质实验人员开发研究了有机组分检测技术方法,无疑是地质实验测试技术发展中最显著的成果之一,这使得地质实验测试技术从传统的无机元素分析发展到无机元素、有机组分分析并重的技术体系,特别在生态环境地质和能源地质 2 大领域中发挥了重要的作用。

随着“地质野战军”装备计划实施,地质实验室引进了气相色谱、液相色谱、气相色谱-质谱仪、液相色谱-质谱仪、三重四极杆液相色谱-质谱-质谱仪等先进的精密仪器,同时也配备了与之相应的快速溶剂萃取、扫描-捕集进样系统、微波萃取、圆盘萃取等样品前处理设备。创建了多种前处理技术和样品检测方法,主要包括:水质、土壤和沉积物和生物样品中挥发性有机物(VOCs)、半挥发性有机物(SVOCs)、有机磷农药、有机氯农药、石油类污染物等检测技术。这些方法的建立主要围绕全国地下水污染调查、地下水水质监测、全国土地污染现状调查以及土壤污染状况详查等国家重大项目需求,其技术成果很好地发挥了支撑服务作用。在能源地质领域,油气研究项目日益增加,油气地球化学分析测试能力也相应的快速发展,逐步建立了油气化探样品中酸解烃和水解烃的气相色谱法、稠环化合物的荧

光分析方法、H-He-Ne 检测技术,烃源岩总有机碳(TOC)分析方法、Rock-Eval 分析、以及烃源岩抽提物和原油的石油族组分分析、饱和烃、芳烃分析方法(尹明,2009)。

近年来,能源矿产、环境科学和生态地球化学的迅猛发展,进一步促进了地质行业有机分析技术的全面拓展。石油、地下水、土壤和沉积物、岩石、农作物等都是有机分析的重要对象。样品前处理与净化技术不断改进,目前常用的有吹扫-捕集、溶剂萃取、固相萃取、固相微萃取、动态针捕集阱、顶空等(刘娇等,2015;黄何何等,2018;刘玉灿等,2020)。多种有机组分同时快速检测的方法技术体系及相关质量监控体系日益完善,地下水水质检测从必测 37 项到 100 多项,土壤有机污染分析也针对复杂基体发展了多种痕量有机污染物的检测技术,其分析的检出限从 10^{-6} 到 10^{-9} ,甚至 10^{-12} ,重现性和分析精度均有明显提升。

1.3 同位素分析技术

同位素分析技术的起源和革新离不开质谱仪的发明和演进。20 世纪初,英国著名物理学家汤姆逊(Thomson J J)发现氦同位素所用的抛物线装置可谓现代质谱仪的雏形,随后,阿斯顿(Aston F W)据此建造了世界上第一台单聚焦质谱仪,利用该仪器发现了几十种同位素并测试了自然丰度,此后,随着质谱仪的更新换代,元素周期表中的同位素被逐一发现和测量。同位素分析技术发展至今,已经出现了稳定同位素质谱仪(IRMS)、多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)、静态分析质谱仪(SVMS)、热电离质谱仪(TIMS)、加速器质谱仪(AMS)、二次离子质谱仪(SIMS)、激光电离质谱仪(LIMS)和激光共振电离质谱仪(LRIMS)8 种类型的同位素质谱仪,这些同位素质谱仪已应用于各行各业的研究工作中。同位素分析技术在地质领域的应用主要包括同位素定年和同位素地球化学示踪 2 个方面。Rb-Sr(Olierook et al., 2020)、Sm-Nd(Segvic et al., 2020)、Ar-Ar(Vincenzo et al., 2021)、U-Pb(Jnf et al., 2021)、Lu-Hf(Alexander et al., 2021)、Re-Os(Greenman et al., 2021)等经典分析方法,为准确约束地质事件发生的年龄、指导矿床勘探开发、探索地质体时空分布以及研究大陆动力学问题等工作提供了依据。H、C、N、O、S 等传统稳定同位素在水循环研究(袁瑞丰等,2020;田立德等,2021;Yurch-

enko et al., 2021)、气溶胶研究(马皓等, 2021)、古环境分析(徐向春等, 2021)、农产品产地溯源(杨静洁等, 2020)、有机污染物分析(吴健等, 2021)等方面发挥了重要作用。随着高精度、高灵敏度的 MC-ICP-MS、SIMS、TIMS 等科学装置的发展与进步, 包括 Li、B、Mg、Si、Cl、Ca、Ti、V、Cr、Fe、Ni、Cu、Zn、Ge、Se、Mo、Sr、Ag、Cd、Sb、Hg、Tl 等在内的非传统稳定同位素也迅速发展起来, 为研究地幔演化、岩浆的产生和分异、地壳的形成、俯冲物质再循环、古气候环境恢复、环境生态演化、污染物来源示踪等重大问题研究提供了新的手段(黄方, 2011, 2015; 孙卫东等, 2012; 朱祥坤等, 2013; 王立成等, 2014; 赵新苗等, 2020; 周秋石等, 2020; 夏芝广等, 2021; Katrin et al., 2021)。同时, 稀有气体(He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn)同位素测试技术也在不断发展, 在地球各圈层或不同物质源区具有明显不同的稀有气体同位素组成, 故而它们在研究深源物质、地幔演化、壳幔相互作用、判别地幔柱等构造环境方面具有灵敏而独特的地球化学示踪作用(马锦龙等, 2003; 徐永昌等, 2003; 李晓斌等, 2007; Hanyu et al., 2011; 武丽艳, 2019; Eduardo et al., 2021)。

1.4 微束分析技术

微束分析是在微米-纳米尺度上精确分析天然和人工合成样品的物相、形貌、结构、化学成分和同位素组成等。在地质科学研究中, 电子探针(EP-MA)、扫描电镜(SEM)、激光拉曼光谱(LRM)、红外光谱(IRS)、X 射线衍射仪(XRD)等大型微束分析设备在岩石矿物的成分、形貌、结构等特征研究中发挥了不可或缺的作用(叶大年等, 1984; 周剑雄等, 1988; 徐培苍等, 1996; 张慧等, 2016)。

电子探针具有空间分辨率高、无损、分析元素范围广、基底效应小等优点, 是研究地球与行星物质组成最基础的微区分析手段, 广泛应用于岩石学、矿床学、环境科学、天体与行星演化等研究领域(张迪等, 2019; 陈意等, 2021)。近年来取得的重要突破包括: ①场发射电子探针的出现, 大大提升了电子探针分析的空间分辨率和信噪比(张迪等, 2019), 对微细疑难矿物及微米-亚微米尺度化学组成不均一样品的成分与显微结构分析具有重要作用。②通过在水技术方法上提高测试束流、增加检测时间而降低元素检出限, 以及在硬件上应用新型全聚焦大晶体替代传统分光晶体而提高元素 X 射线计数率, 实现了样品

中微量元素的准确分析(Solber et al., 2007; 王娟等, 2017; Cui et al., 2019; Su et al., 2019)。③得益于大晶面间距分光晶体的应用与特定分析条件的探索(Cheng et al., 2019; 吴润秋等, 2020; 张文兰等, 2020), 以及软 X 射线谱仪的出现(Takahashi et al., 2014), 使得 Be、B 等超轻元素电子探针分析精度得到显著提升。④矿物中 Fe^{3+} 测试与计算不断优化(Hofer et al., 1994; Zhang et al., 2018; 李小犁等, 2019; Li et al., 2020a, 2020b)。此外, 副矿物电子探针化学定年和稀土矿物电子探针测试方法上近年也具有较大的提升和发展。

扫描电子显微镜(SEM)是观测物质表面形貌的基础微束分析技术, 具有成像直观、分辨率高、景深长、立体感强、样品制备简单等特点, 其空间分辨率已可小于 1 nm, 放大倍数可大于 100 万倍。环境扫描电镜(ESEM)的低真空成像技术可对未经喷镀的样品直接进行表面微观形貌和结构观察, 有效地解决了水、油及非导电样品的形态结构成像问题, 避免了导电层对样品表面亚微米级别信息的掩盖(焦淑静等, 2014; 于亮等, 2016; 程涌等, 2018)。扫描电镜与 X 射线能谱仪(EDS)、阴极发光光谱仪(CL)、电子背散射衍射仪(EBSD)、拉曼光谱仪等联用, 可在科学研究中获得更全面的样品信息(胡鑫蒙等, 2020)。在扫描电镜中配置冷台、热台、拉伸台、微操纵/微注入系统等附件, 可进一步扩展 SEM 的功能, 使 SEM 成为一个小型微观实验室, 实现原位微观的实时观测, 记录矿物生长、脱水、腐蚀、相变、形变、断裂等动态过程, 研究相关的物理化学反应变化及矿物与环境的相互作用(Wang et al., 2007)。聚焦离子束(FIB)扫描电镜还可在精密刻蚀加工材料的纳米结构、微切割观察样品剖面、制备透射电镜样品等功能的基础上, 观察样品形貌, 获得更多的样品表层信息(王羽等, 2018; 王晓琦等, 2019)。近年来, 多家仪器公司都大力研发了矿物自动化识别系统, 在扫描电镜和多台能谱仪联用的基础上, 以强大的矿物数据库为支撑, 实现薄片矿物自动识别与含量统计, 解决了微细疑难矿物的识别难题(温利刚等, 2018; 陈倩等, 2021; 吴中贤等, 2021; 张然等, 2021; 朱丹等, 2021)。

拉曼光谱是分子或凝聚态物质的振动散射光谱, 是取得物质分子结构和状态信息的重要手段, 具有微区、原位、快速、无损、高灵敏度、高分辨率等特

性,可快速、准确地对物质分子结构、成分、相态变化等内容进行深入研究。在石油地质和流体地质学研究方面,拉曼光谱发挥着重要的作用(徐培苍等,1996;卢焕章等,2005),也可广泛应用于矿物鉴别、矿物结构和应力分析、文物鉴定、珠宝玉石鉴定、复合材料分析、聚合物分析、半导体材料分析等。近年来,拉曼光谱在研究锆石成因、测定流体包裹体成分与盐度(王志海等,2014;董会等,2021)、测定单个流体包裹体 CO_2 碳同位素等方面进行了积极探索,为矿物结构与成因分析、流体包裹体成分与同位素组成研究和应用开创了新局面(李荣西等,2015;董会等,2016;李佳佳等,2017)。拉曼光谱与冷热台、扫描电镜、原子力显微镜等联用技术得到了快速发展,未来有望在地质研究中发挥更多的作用。

X 射线衍射是主要用于研究晶体物质中的衍射效应并进行物质结构分析的技术,其应用遍及地质、矿产、石油、材料等各个与物质晶体结构或非晶结构相关的领域(刘粤惠等,2003)。在矿物种属确定、类质同象和结晶度研究等传统领域发挥重要的作用,在矿物结晶过程研究、矿物表面研究、晶体结构测定方面也均有新的应用。近 10 多年来,中国对于 X 射线衍射技术从基础理论到不同领域的新技术方法研究均取得了重要进展(刘粤惠等,2003;黄继武等,2012)。利用粉晶衍射进行矿物晶胞参数精修、有序无序、类质同象等研究认识矿物及矿床成因,可指导地质找矿中推测成矿规律和找矿方向(Hiroaki Sato et al.,1993;李山坡等,2012)。在层状硅酸盐矿物和黏土矿物研究中,对黏土矿物的有序-无序变化可解释其形成的地质条件、气候环境等(陈涛等,2005;Li et al.,2018);利用沉积岩中伊利石进行 X 射线衍射分析,研究沉积岩埋藏或剥蚀程度(刘国生等,2003);在滑坡滑带黏土矿物的定向性研究方面,可依据滑带土黏土矿物的 X 射线衍射定性定量结果,对滑坡稳定状态进行推测(王洪兴等,2004)。

2 西北地区地质实验测试技术研究进展与应用现状

2.1 发展历程

西北地区作为中国重要的能源资源基地,矿产资源丰富,在新中国成立初期,就成为矿产资源普查和地质找矿的主战场,先后组建了地矿、核工业、有

色、冶金、煤炭、武警黄金各专业地质找矿队伍,作为地质工作“眼睛”的各专业实验室应运而生。

西北地区地矿行业实验室最早起源于 1957 年的兰州中心实验室,隶属于原地质矿产部,20 世纪 60 年代初,地矿系统实验室进行了机构调整。1962 年,西安地质矿产研究所成立,次年筹建实验室,定位为西北地质找矿提供金属元素化学分析支撑服务。之后,为加强矿产综合利用研究,在甘肃永登组建了第十实验室,主要承担全国含铀矿石的物质组成和选冶实验试验,1980 年,逐步扩建成为西北地区大区测试中心,在完成本省测试任务的同时,要承担大区区内疑难样品检测技术研究任务(吴淑琪,2013)。如今,西北地区地质行业实验室主要以各省地矿局实验室、各地队级地质实验室、大区中心实验室、以及由黄金部队转制而来的各综合调查中心实验室等为主,这些实验室共同承担西北地区基础地质调查、矿产资源调查、能源地质调查、水文地质与水资源调查、环境地质调查、生态地质调查,以及自然资源综合调查相关样品检测技术研发与测试。

西北地区地质实验测试技术的发展应用,与全国地质实验测试技术发展历程有着相似的规律,即围绕现代地球科学发展需求的特点,从无机分析技术到有机分析,从传统无机分析向形态分析,从宏观整体分析向微观的微区分析,从单元素化学分析向以大型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等的不断拓展转型。同时,西北地区地质实验测试技术的发展也有着自身区域上的特点,从金川铜镍矿会战中的基性-超基性岩分析方法、铂族元素分析方法、铬铁矿分析方法、含粗粒金矿样品采集加工与分析、锰矿石中铁的快速测定、稀散元素现代分析方法等的研究与建立,主要是针对西北地区地质找矿过程中拟解决的分析测试技术难题而开展,体现出了西北地区矿产资源与环境的特点。

2.2 研究进展与应用

经过 60 年一甲子的风雨历程,西北地区地质实验测试工作在无机元素分析领域、有机分析领域、同位素分析领域和微束分析领域均取得了长足发展,并在基础地质、矿产资源、油气能源地质、水文地质和土壤生态地球化学等各专业调查领域得到广泛应用。笔者以中国地质调查局西安地质调查中心(以下简称“西安地调中心”)取得的成果为缩影,详细阐述中国西北地区地质实验测试技术的研究进展及其

在地质调查中的应用。

2.2.1 无机元素分析领域

西北地区地质实验测试无机分析技术开始于 20 世纪 60 年代,主要通过经典的重量法、容量法、分光光度法、极谱法等方法完成对地质样品的分析,先后完成了《离子交换分离铬,EDTA 连续滴定铁和铝》《强碱分离铬测定镍、钴、锰和钛》《过氧化钠-氢氧化钠混合溶剂对铂坩埚侵蚀的研究》《非水滴定法测定岩石矿物中二氧化碳》等方法研究报告。

20 世纪 70 年代,西安地质矿产研究所(现“西安地调中心”)与国内 8 个科研单位共同承担了“甘肃金川特大型硫化铜镍矿床中铂族元素综合利用”科研项目,该项目共取得 2 项主要成果:①攻克了 Os、Ir、Ru、Rh 的分析方法。②利用化学物相法查明了铂族元素在硫化铜镍矿中的赋存状态,为冶金 的采选冶工艺流程制定提供了可靠的科学依据。近年来又发展了铈镍试金 ICP-MS 测定铂族元素的分析方法。

1977 年,许大兴先生主持编写的《铬铁矿石分析》是中国铬铁矿分析方面的首部专著。其研究团队以铬铁矿和超基性岩分析方法深厚的技术为依托,完成了《铬铁矿、超基性岩石标准样品的研制及测试方法》科研项目,制备了 2 个铬铁矿、2 个超基性岩的标准样品,成为中国首批一级地质标准物质,填补了中国地质部门标准样品的空白,该成果获得了地矿部科技成果一等奖。此后继续开展了超基性岩标准样品中痕量元素分析定值的研究获地矿部科技成果二等奖。

进入 21 世纪以来,随着地质分析测试技术的飞速发展,特别是随着“野战军”装备的相继到位,西安地调中心在无机元素化学分析及方法研究方面得到了快速的发展。逐步建立了各种岩石矿物化学分析方法、化探样品配套分析方法以及各类水质分析等一系列完整的检测技术体系,为西北地区基础地质调查、矿产资源勘查与评价、地球化学质量调查等地调科研工作提供了重要基础数据。

磺基水杨酸光度法是测定 Fe 较常用的一种分析方法,但由于 Mn 离子对 Fe 的测定有干扰,导致测定结果严重偏高。通过研究,采取加入盐酸羟胺来消除锰矿石中 Mn 的干扰,实验基于在 pH 10 左右,Fe 与磺基水杨酸生成相对稳定的 2:1 黄色络合物在 420 nm 处有最大吸收峰,建立了磺基水杨

酸光度法快速测定锰矿石中 Fe 的分析方法。该方法简单、快速、实用,可用于各种品位锰矿石中 Fe 的测定,特别适合大批量样品的分析(程秀花等, 2014)。该研究成果成功用于陕西后沟锰矿大量样品中 Fe 元素检测。

稀散元素又称分散元素,是指在自然界中并不形成独立矿床而以杂质状态分散存在于其他元素的矿物中的元素,他们在地壳中的含量非常低,分布又很分散,绝大部分伴生在有色金属、煤及铁矿中。传统分析中针对单个元素采取一种分析方法,比如分光光度法、原子吸收光谱法、极谱法等,并且需要繁琐的前处理富集过程。对于痕量甚至超痕量的稀散元素来说目前尚没有成熟的分析方法。西安地调中心利用电感耦合等离子体质谱仪,创建了稀有分散元素 Ga、In、Tl、Ge、Se、Te 的现代分析方法(黎卫亮等,2014;程秀花等,2016);研究有机试剂在电感耦合等离子体质谱法测定分散元素的作用,探讨有机试剂的增敏机理,自制一种氢化物发生器装置,该发生器利用 U 型管连通器原理及下水管道排水原理达到气液分离的目的,经试验此装置具有很高的灵敏度以及较好的稳定性(RSD<8%)和低的残余效应(图 1)。研究氢化物发生与电感耦合等离子体质谱仪联用测定稀散元素分析方法,重点探讨了氢化物发生体系中的酸、碱浓度以及载气流速的影响,考察了稳定性和残余效应,最终建立了 HG-ICP-MS 测定分散元素 Ge、Se 和 Te 的分析方法,方法检

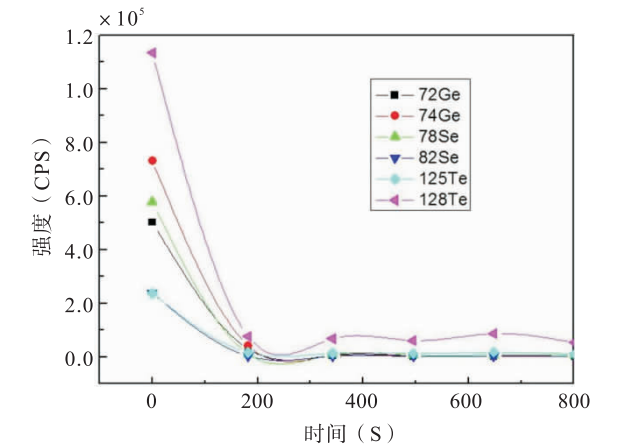


图 1 自制氢化物发生装置与 ICP-MS 联用测定 Ge、Se、Te 的残余效应图

Fig. 1 Residual effect of Ge, Se and Te determined by the combination of homemade hydride generator with ICP-MS

出限分别为 $0.001 \mu\text{g/g}$ 、 $0.001 \mu\text{g/g}$ 和 $0.006 \mu\text{g/g}$ 。所建立的分析方法经同行实验室验证和使用,其准确度和精密度令人满意(程秀花等,2016),氢化物发生装置已获国家实用新型专利授权(专利号:ZL 2016 2 0900876.6)。

针对西安地调中心矿山地质环境调查研究及环境评价研究室的需要,开展了水土农作物环境样品的分析方法试验,可承担水质、土壤、植物、空气等多种环境样品中微量、痕量元素分析,是中国较早从事矿山环境样品分析的实验室。党的十八大以来,面对国家对生态环境地球化学调查与评价新需求,西北地区各地质实验室开展了生态环境地球化学样品分析方法体系的建立,包括地下水 DZ/T 0064 系列、天然饮用矿泉水 GB 3538 系列、生活饮用水 GB/T 5750 系列标准检测能力建设,农用地、建设用地等土壤样品多种检测项目方法扩展。2018 年,与国土资源部西安矿产资源检测中心(陕西省地矿局实验室)、核工业二〇三研究所分析测试中心等多个实验室一并参加了生态环境部、自然资源部、农业农村部联合组织的全国农用地土壤污染状况详查,完成西北地区土壤、农产品中重金属元素、有机污染物的测试分析,为查明西北地区农用地土壤污染的面积、分布及其对农产品质量的影响提供了扎实、可靠的数据支撑,得到了一致好评。随后组织 5 名技术人员参加了陕西生态环境监测专业技术人员大比武,在初赛中取得了满意成绩,为进一步涉入生态环境领域打下基础。近年来一直致力于研究土壤样品中各重金属元素的形态和有效态分析,2019 年,协助陕西省地质矿产实验研究所有限公司开展了“复垦土地样品标准检测方法精密度协作试验”,开展了土壤样品中氮、磷、钾、水解氮、有效磷、速效钾、缓效钾等多种指标分析方法研究,同时为中心内部新疆土地质量化学调查等相关研究成果提供技术支持。

2.2.2 有机分析领域

(1)油气能源地质调查领域。油气地质分析技术主要分为有机地化方面和沉积及储盖层方面的分析技术,其中有有机地化方面的分析技术主要有:岩石超临界提取、烃源岩模拟实验、有机岩石学分析测试、有机同位素分析等。具体分析技术包括:烃同位素分析测试技术;气体分析技术(组分、含气量、轻烃);包裹体分析测试技术;镜质体反射率 $R_o(\%)$ 测试技术;生物地球化学测量法;蚀变碳酸盐法(ΔC

法);有机质测定(类型、成熟度、丰度);岩石学分析;元素分析(常量、微量);等温吸附试验(汪双清,2005)。目前,中国已建立了一整套油气资源和储盖层性能评价的实验分析方法,共制订了石油地质实验分析测试项目的石油天然气行业标准 70 余个,国家标准近 10 个,这使得各实验室分析数据得到统一规范,分析质量得到不断提高,推动了全国石油地质实验室分析水平的整体提高。

自 1995 年,西安地调中心组建能源地质调查业务室以来,陆续为西北地区各石油公司提供技术服务,并承担油田技术服务与油气能源调查项目,取得了一系列的成果与奖项。在此过程中实验测试室围绕项目需求开展了相关检测技术研究并承担了大量样品检测任务。完成了银额盆地及其邻区石炭—二叠系油气资源远景调查项目 5 万余件样品测试(2007~2016 年),包括酸解烃、稠环芳烃、芳烃及其衍生物、顶空间轻烃检测指标等,并建立和优化了相应测试技术方法(赵江华,2013;李忠煜,2014,2018),设计发明了一种数据处理的软件(专利号:ZL 2016 1 0668152.8)。支撑服务了关中地区氦气资源调查项目(2013~2019 年),完成 4 万余件样品测试,优化了氦气测试方法(何峻,2018),研发了一种气密性装置获国家实用新型专利授权(专利号:ZL 2015 2 0324737.9)。

(2)土壤、水地球化学、生态调查领域。西北地区除了资源能源优势之外,也是长江、黄河的源头区域及黄河的主要流域,土壤、水有机污染物检测尤为重要。人类工业化进程加速,各类生产、生活活动带来的大量有机污染物,导致近年来有机污染物分析呈现如下状态:①污染物种类与数量不断增多,目前常见的有机物指标有几百种,而且每年都有新的污染物加入(李德鹏,2014)。②检测精度要求不断提高。③设备自动化逐步加强(杨家欢,2019)。④分析与前处理难度进一步加大,尤其是痕量分析的前处理净化过程。针对不同种类的有机物与检测精度要求,需采用不同的设备以及检测器进行分析测试。

面对全国地下水污染调查、地下水监测、全国土壤污染状况详查等多个重大国家项目,西北地区各地质实验室首当其冲成为了主力军,发挥行业优势,承担大量样品测试任务。2012 年以来,西安地调中心实验室陆续参加陕北环评项目土壤中 VOCs、SVOCs 等多组分 GC-MS 检测;水中三氯甲烷、四

氯化碳、石油类等多组分的 GC-MS、U-COL 测定,分析样品千余件。2014~2016 年,在陕西省资源科技统筹中心支持下,西安地调中心实验室建立了矿区与油气田周边水质分析公共检测平台。2017~2020 年,承担国家重点研发项目“国家质量基础的共性技术研究与应用-土地生态恢复评价检验检测及质量控制标准研究”中 2 个子课题的研究工作,开展复垦土地标准检验方法有机污染物-石油类测定,及复垦土地标准检验方法有机污染物-硝基苯、苯胺、酚类测定方法的研究和探索(李忠煜,2021;赵江华,2021)。目前西安地调中心实验室正在开展健康地质、城市地质相关的有机检测方法研究。

2.2.3 同位素分析领域

作为中国地质调查局西北大区中心,西安地调中心实验室拥有原地矿部(自然资源部)第一台同位素质谱仪 MAT 261,技术人员依据该仪器研究开发了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素定年方法,为陕西、新疆、青海和甘肃等西北地区野外地质队伍的地调科研工作提供了强有力的支撑(侯福良,1995)。

2012 年以来,西北地区地质实验室相继配备了扫描电镜、激光剥蚀系统和多接收等离子体质谱仪等高精尖仪器设备。实验技术人员为了满足新时代地质调查工作的需求,依托新仪器承担中国地质调查局科技专项和国家自然科学基金项目,相继开发了一系列测试方法,为解决西北地区地质填图、矿产调查、油气勘探等工作中存在的问题提供了有力支撑。

基性和超基性岩定年是地质年代学领域的一个难题。尽管采用斜锆石可以很好地限定基性、超基

性岩的形成年龄,然而斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法并不成熟,难点在于对斜锆石元素分馏行为的准确校正,锆石 U-Pb 定年的校正策略并不适用于斜锆石。李艳广等(2015)采用激光剥蚀系统、等离子体质谱仪和扫描电镜等仪器手段对斜锆石进行研究发现(图 2):①斜锆石与锆石的激光剥蚀行为不同,在相同激光剥蚀条件下,斜锆石的剥蚀坑更深,熔融程度更严重,剥蚀坑底有更多物质残留。在变换能量密度时,锆石的剥蚀坑貌特征变化不大(均平整,坑内残留物质少),而斜锆石的剥蚀坑貌特征与能量密度关系密切(只有在能量密度 $\geq 9\text{ J/cm}^2$ 时,剥蚀坑才变得平整,且坑内残留物质变少)。不同的激光剥蚀行为可能与二者的物理性质差异有关,将会进一步引起二者元素分馏程度的差异。②斜锆石的元素分馏程度远高于锆石,经定量评价元素分馏效应,探索出 10 J/cm^2 的剥蚀能量密度和 5 Hz 的剥蚀频率为适用于斜锆石定年的最佳激光剥蚀条件。③经对比,新的校正方法能够准确校正斜锆石的元素分馏效应,用于锆石的 Glitter 和 ICPMSDataCal 校正软件并不适用于斜锆石。④通过应用实例验证,新建立的斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法能够得到与 SHRIMP 斜锆石 U-Pb 定年方法一致的测试结果,新的校正方法较 Glitter 和 ICPMSDataCal 而言,准确度更高,精度略差。该方法经地质实例验证能够准确获取斜锆石的 U-Pb 年龄。由于目前缺乏基体匹配且元素含量均匀的标准样品,斜锆石元素含量的精确测定仍无法实现(李艳广等,2015;Li et al.,2021)。

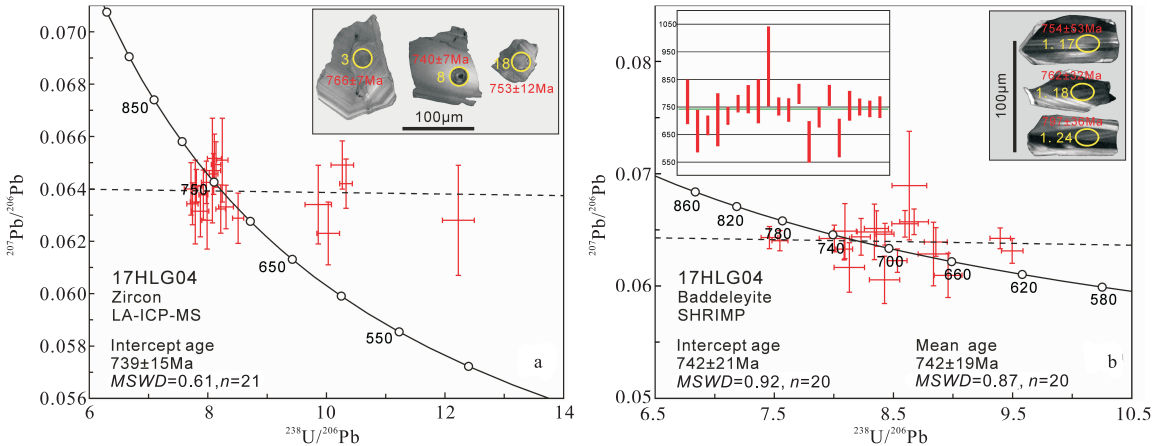


图 2 阿尔金红柳沟辉绿岩锆石、斜锆石 U-Pb 年龄测试结果 Tera-Wasserburg 投图

Fig. 2 Tera-Wasserburg plot of zircon and baddeleyite U-Pb ages of Hongliugou diabase in Altun Tagh

原位微区微量元素分析方法依赖基体匹配的自然样品做外标来校正测试过程中不可避免的元素分馏效应和质量歧视效应。然而,适合做标样的自然样品往往极度匮乏,针对这一难题,汪双双等(2018)通过合适浓度梯度标准溶液的引入,在没有基体匹配固体外标的条件下,有效校正了 LA-Q-ICP-MS 原位分析过程中的元素分馏与质量歧视效应,以及仪器漂移等,精确测定了固体样品中微量元素含量。该技术发明可使 LA-Q-ICP-MS 仪器应用到更广泛的地质、环境样品中。

对于晶体粒径小、成因复杂或稀有珍贵的矿物样品,由于不满足多次剥蚀分开测试的条件,从而单次剥蚀完成 U-Pb 定年、Hf 同位素及微量元素的同时测定具有重要意义。李艳广等(2021)技术人员采用 Coherent Geolas Pro 型激光剥蚀系统、Agilent 7700 x 型四级杆等离子体质谱仪以及 Neptune plus 型多接收等离子体质谱仪联用建立了矿物 U-Pb、Hf 同位素及微量元素同时测定的分析方法。依据该方法的测试数据,研究人员可同时获得矿物的年龄、温度(Ti 温度计)和用于同位素示踪的信息。该实验室采用 Iolite 软件和实验室自编的 Hflow 软件(国家发明专利:201810087759.6)处理测试数据,采用 $^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (1.466 88~1.467 46) 和 $^{180}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (1.886 28~1.887 04) 2 对稳定同位素评价仪器和实验条件,采用 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 与 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的相关性来评价同质异位素干扰校正效果,对于高 Yb 样品,该实验室采用人工添加了 Yb 元素的人造锆

石 MUN($^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf} = 0.22$) 监控实验过程(Gao et al., 2021)。

独居石是进行稀土矿床年代学研究的理想矿物,然而成因复杂的小颗粒独居石的精确定年通常比较困难,汪双双等(2016)开发了一种利用激光剥蚀-四级杆电感耦合等离子体质谱仪在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 小束斑条件下测定独居石 U-Th-Pb 年龄的方法(图 3、图 4)。

榍石是研究中低温变质岩及热液成因岩石的地质年代的理想矿物(孙金凤等,2009,2012),精准分析榍石的 U-Pb 年龄除了要考虑基体效应测试结果的影响,还要研究榍石的元素分馏行为,制定合理的校正策略。靳梦琪等(2020)在前人研究的基础上,从榍石的元素分馏行为研究出发,发现榍石矿物的元素分馏行为无规律的现象,并在对比现行几种校正方法后,认为“截距法”校正原理更适用于榍石,并据此提出了一套新的榍石 U-Pb 定年分析方法。该方法经地质实例验证,能够准确获取榍石的 U-Pb 年龄(图 5)。

2.2.4 微束分析领域

在西北地区地质行业实验室中,微束分析是西安地调中心一大特色,主要以 X-衍射仪、扫描电镜、激光拉曼光谱仪以及电子探针等大型仪器为平台,通过多年的探索研究,在岩石矿物成分分析、矿物鉴定、矿物物相分析、微区分析、结构分析以及宝玉石鉴定等方面积累了丰富的经验、建立了一系列分析方法。

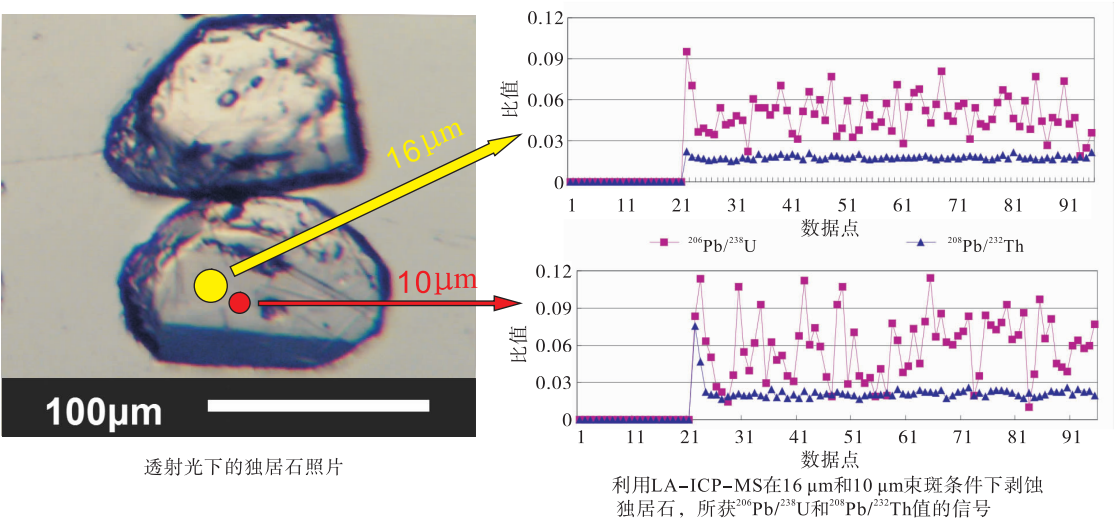


图 3 小束斑独居石 U-Th-Pb 定年测试方法实验图

Fig. 3 Small volume U-Th-Pb dating test method of monazite

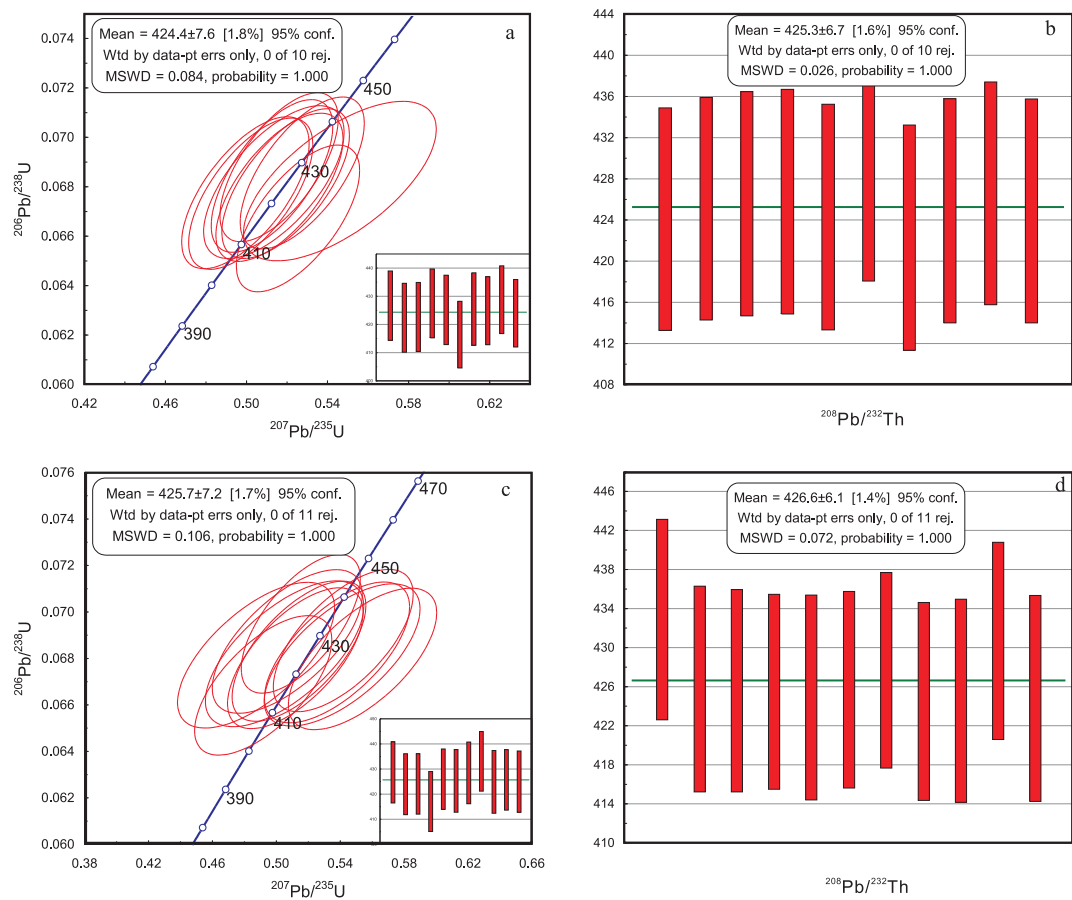


图 4 小束斑 44069 独居石标样 U - Th - Pb 定年测试结果(10 μm 、16 μm)

Fig. 4 10 μm and 16 μm U - Th - Pb dating result of 44069 monazite

(1)常温与低温条件下流体包裹体拉曼光谱分析技术。流体包裹体的盐度是了解古流体的物理化学性质、矿床与油气的形成和演化条件的重要参数之一。在天然流体包裹体盐水溶液相中,NaCl 是最常见的盐类,此外, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 HS^- 、 HSO_4^- 等也是常见的离子(团)(Roedder,1990;Burke,2001)。传统的冷热台显微测温法获得的流体包裹体的盐度是假设流体盐水溶液相为 NaCl - H_2O 体系,依赖一定的相图计算而得的,与地质流体的实际盐度存在较大偏差。叶美芳等(2009)应用激光拉曼光谱仪对钠盐水溶液中常见的 SO_4^{2-} 、 HSO_4^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 等阴离子团的拉曼光谱特征进行研究,建立了光谱参数与浓度的定量关系,为进一步的流体包裹体理论和方法研究奠定了基础。

氯化物是自然界流体包裹体盐水溶液相中最普

遍和最重要的溶质,强离子键化合物的特性使其在常温下没有明显的拉曼效应,无法利用拉曼光谱全面研究流体包裹体气液相组分或测定盐度。王志海等(2014)联合利用激光拉曼光谱和冷热台,原位采集了不同盐度的 NaCl - H_2O 和 CaCl_2 - H_2O 标准盐水溶液在低温下(-185 $^{\circ}\text{C}$)形成的冰、NaCl 水合物和 CaCl_2 水合物的拉曼光谱(图 6),分析了不同盐度标准盐水溶液形成的水合物拉曼特征峰的变化规律,尝试建立流体包裹体盐度低温拉曼光谱测定方法。并利用愈合人工水晶法合成的包裹体标样检验了用上方法低温测定流体包裹体盐度的可靠性,结果表明该技术用于盐度大于 0.5 mol/L 的 NaCl - H_2O 体系流体包裹体时,数据精度大于 20%;用于盐度大于 0.5 mol/L 的 CaCl_2 - H_2O 体系流体包裹体时,数据精度最高可达 5%,完全可达到半定量-定量测定的要求。该方法在天然流体包

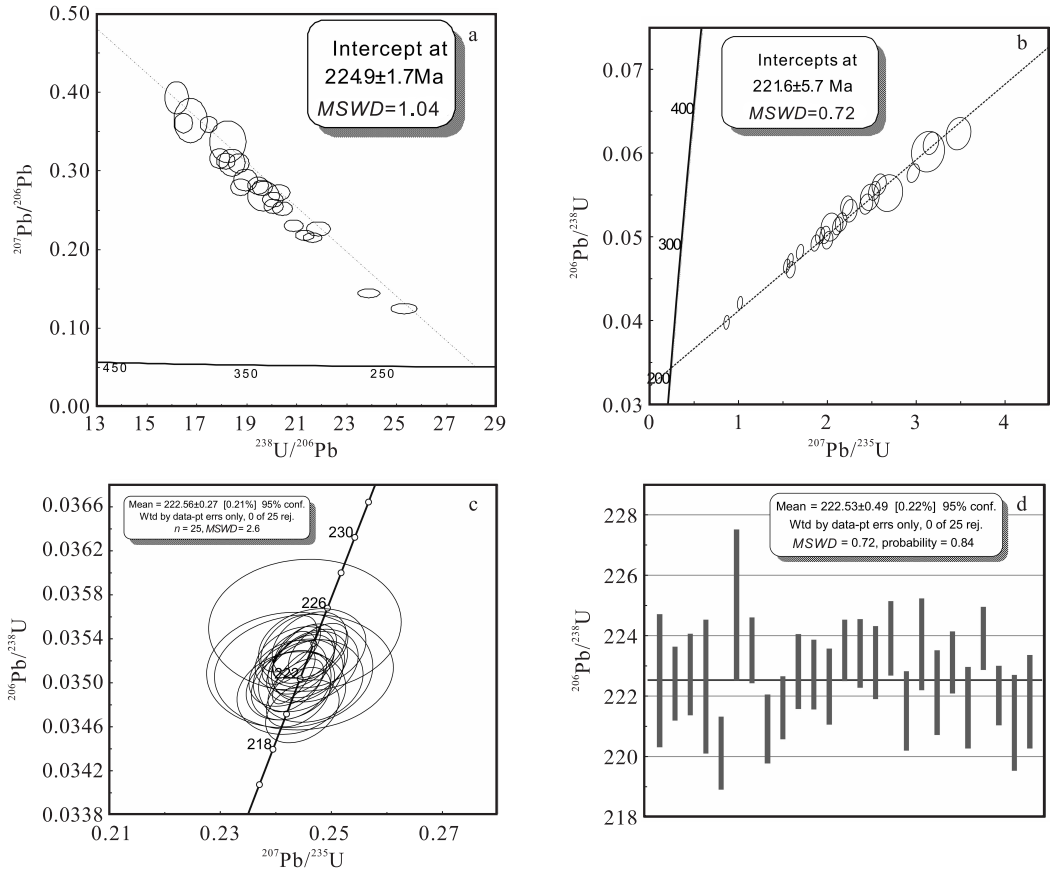


图 5 老牛山榍石、锆石 U - Pb 年龄测试结果投图
Fig. 5 Plot of U - Pb age of Laoniushan titanite and zircon

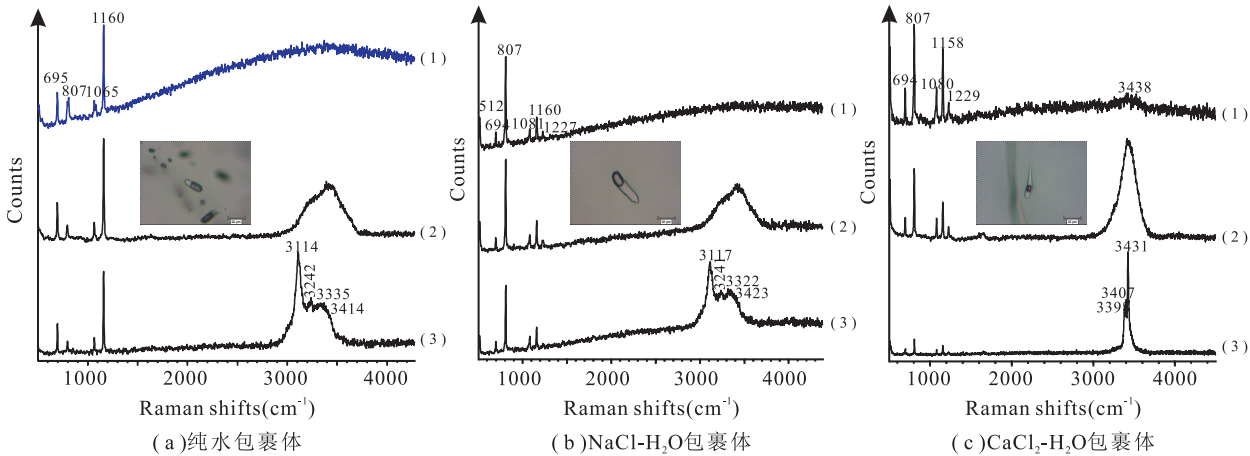


图 6 合成包裹体常温下气相(1)、液相(2)和-185℃(3)的拉曼光谱图

Fig. 6 Raman spectra of gas phase (1), liquid phase (2) and - 185℃ (3) of synthetic inclusions at room temperature

裹体研究中也得到了很好地应用。本技术可在确定主流体体系的同时实现盐度半定量-定量测定,准确度优于传统方法。

基于上述研究,西安地调中心拉曼光谱实验室

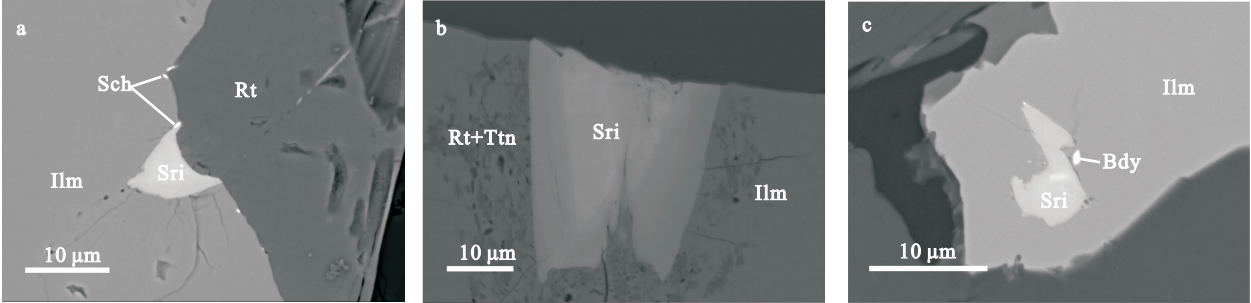
采用 VISUAL BASIC 编写了一套“流体包裹体计算”软件,可应用于 5 个常见流体包裹体体系的热力学参数计算,包括:纯 H₂O、纯 CO₂、H₂O - CO₂、NaCl - H₂O 及 CO₂ - NaCl - H₂O 体系。本程序界

面友好,使用方便,而且引入了比较新的算法(如用经验公式代替插值法,CO₂-NaCl-H₂O 体系引入了比较新的用盐度来校正盐水溶液中 CO₂ 溶解度的算法等)。该软件自编制成功以来就在地质同行中免费推广使用,深受认可,为流体包裹体热力学参数的计算提供了便利,也为流体包裹体研究从定性走向定量奠定了基础。

(2)含铀-富铀锆钛石变种的发现及特征研究。在中国南阿尔金地区高压基性麻粒岩中,研究人员发现了一种主要化学组成为 TiO₂、ZrO₂、UO₂ 的微米级疑似新矿物,确定了其矿物种属及成因机制(刘亚非等,2014;周宁超等,2019;魏小燕等,2019)。主要取得以下认识:①该矿物微细分散,粒度介于 1~30 μm,多数仅约 10 μm,始终与金红石-钛铁矿组合或独立钛铁矿伴生(图 7)。根据化学成分和晶体结构特征确定了其为已知矿物 Srilankite(ZrTi₂O₆)的含铀-富铀变种,其晶体化学式可简写为 (Zr, U)Ti₂O₆,其中 U 与 Zr 为类质同象替代关系,矿物中 UO₂ 含量最高可达 20.83%。②研究认为该矿物为寄主岩石高压基性麻粒岩退变质过程中形成,在该过程中金红石发生分解向钛铁矿逐渐转变,并伴随

有 Zr、W、Nb 等多种微量元素的释放、扩散、迁移与富集。据此提出了该矿物新的成因模式:即金红石在分解退变为钛铁矿的过程中,其释放出的 Zr 元素部分会随着新生钛铁矿的结晶进入钛铁矿晶格,部分会反扩散进入残余金红石中,导致金红石与钛铁矿接触部位 Zr 元素含量明显升高,另一部分 Zr 元素会与 Ti、U 元素结合形成 Zr 的独立矿物含铀-富铀锆钛石,而 U 元素可能来源于变质流体。含铀-富铀锆钛石的成因模式对矿物尺度高场强元素迁移富集机理具有重要的指示意义。

(3)制定《阿拉善玉地方标准》。王轶等(2015)首次系统地研究了内蒙古阿拉善地区石英质玉石的分布与产状,研究了其矿物学、宝石学和地球化学特征,阐述了其成因机制,并科学命名和定义了新的玉石品种——阿拉善玉。根据研究成果制定了《阿拉善玉地方标准》(DB 15/T715—2014),于 2015 年 3 月 15 日起在内蒙古自治区正式实施。该成果填补了珠宝玉石行业长久以来阿拉善玉产品标准的空白,为阿拉善玉交易的公平与公正提供了依据,在促进科学技术成果转化、培育发展新经济等方面具有引领作用。



Sri. 含/富铀锆钛石;Rt. 金红石;Ilm. 钛铁矿;Sch. 白钨矿;Bdy. 斜锆石;Ttn. 榍石

图 7 含铀-富铀锆钛石及其伴生矿物背散射电子图像

Fig. 7 Backscattered electron images of uranium bearing-uranium rich srilankite and its associated minerals

3 新发展阶段地质实验测试的发展需求与展望

西北地区地质实验工作经过几十年的发展,先进仪器设备从无到有,技术人员从最初的几个人发展壮大到上万人,技术方法从以手工方法为主到以大型仪器分析手段为主导,基本建立了从主量、微量到同位素分析,从无机到有机分析,从固体、液体到

油气样品分析,全方位覆盖基础地质调查、固体矿产资源调查、油气能源地质调查、水文地质与地下水污染调查和土壤生态地球化学调查等工作的实验测试技术方法体系。在实验测试技术的支撑下,经过一个甲子的风雨历程,西北地质调查工作在找矿会战、西部大开发、国家能源安全建设、国土资源大调查和生态文明建设等国家战略实施过程中发挥了重要作用。然而,在取得巨大成就的同时,我们应该清醒地认识到,先进的实验测试技术主要依赖先进的仪器

黄河流域最大的问题是生态脆弱,环境污染不容忽视。因此,黄河流域高质量发展的重点是保护优先。利用现代分析仪器在线实时监测水质指标,利用同位素分析技术追踪污染物来源,无机分析、有机分析协同作业也是未来分析测试的重点发展方向。同位素分析技术是确定地质事件时代和成岩成

矿年龄,示踪成岩成矿物质和污染物来源的重要手段,成为推动地球和环境科学发展的重要动力。当前,同位素技术应用的广度和深度得到很大拓展,被普遍应用于地球科学、农业、生态、水利、医学和环境等领域。其中,微区/微量样品 Re-Os 同位素(武鲁亚等,2021)、Rb-Sr 同位素(朱金等,2021)、Li-Mg-Fe-Cu-Mo-Se 等非传统稳定同位素已成为国际同位素地球化学研究的前沿和发展趋势,同时稳定同位素技术逐渐应用于示踪污染物迁移转化过程和污染源解析研究(杨兵,2021;魏守才等,2021),为生态文明建设提供技术支撑。

聚焦需求,谋长远发展。实验测试工作的本质是支撑服务于地质工作,地质工作的转型升级也驱动实验测试工作转变,从传统的服务模式转向与国计民生紧密结合,新时代的地质工作必然为实验测试工作提供更广阔的发展空间。

致谢:本文撰写过程中得到了西北地区各地矿行业实验室的大力支持,以及西安地质调查中心唐金荣书记、王洪亮副主任、计文化副主任的悉心指导,徐友宁研究员为本文提供了大量建设性的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立 60 周年。

参考文献(References):

- 陈海杰,马娜,薄玮,等.土壤和水系沉积物中硒的价态分析方法研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(3): 871-874.
- CHEN Haijie, MA Na, BO Wei, et al. Research on the Valence State Analysis Method of Selenium in Soil and Stream Sediment [J]. Spectroscopy and Spetral Analysis, 2021, 41(3): 871-874.
- 陈倩,宋文磊,杨金昆,等.矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用—以捷克泰思肯公司 TI-MA 为例[J].矿床地质,2021,40(02):345-368.
- CHEN Qian, SONG Wenlei, YANG Jinkun, et al. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An example from TESCAN Time[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(02): 345-368.
- 陈四箴.动力学方法概况[J].分析化学,1978,6(1):42.
- 陈四箴.矿物原料分析[M].北京:化学工业出版社,1959.
- 陈涛,王河锦,张祖青,等.浅谈利用黏土矿物重建古气候[J].北京大学学报:自然科学版,2005,41(2):309-314.
- CHEN Tao, WANG Hejin, ZHANG Zuqing, et al. An Approach to Paleoclimate-Reconstruction by Clay Minerals [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(2): 309-314.
- 陈意,胡兆初,贾丽辉,等.微束分析测试技术十年(2011~2020)进展与展望[J].矿物岩石地球化学通报,2021,40(01):1-35+253.
- CHEN Yi, HU Zhaochu, JIA Lihui, et al. Progress of Microbeam Analytical Technologies in the Past Decade (2011—2020) and Prospect[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(01): 1-35+253.
- 程俊伟,蔡深文,黄明琴.贵州毛石钨矿区土壤及表层沉积物中重金属形态分析及生态风险评价[J].水土保持研究,2021,28(1):353-359.
- CHENG Junwei, CAI Shenwen, HUANG Mingqin. Analysis on Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Surface Sediments of Maoshi Molybdenum mining Area in Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 353-359.
- 程秀花,黎卫亮,郑民奇,等.自制氢化物发生装置与电感耦合等离子体质谱仪联用测定地质样品中的稀散元素锗和碲[J].岩矿测试,2016,35(3):265-270.
- CHENG Xiuhua, LI Weiliang, ZHENG Minqi, et al. Determination of Germanium and Tellurium in Geological Samples by A Self-developed Hydride Generation Device Paired with Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(3): 265-270.
- 程秀花,唐南安,张明祖,等.稀有分散元素分析方法研究进展[J].理化检验-化学分册,2013,49(6):757-764.
- CHENG Xiuhua, TANG Nan'an, ZHANG Mingzu, et al. Recent Advances of Researches on Analytical Methods for Rare and Dispersed Elements[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2013, 49(6): 757-764.
- 程秀花,吴胜杰.磺基水杨酸光度法快速测定锰矿石中铁[J].冶金分析,2014,34(2):74-78.
- CHENG Xiuhua, WU Shengjie. Rapid determination of iron in manganese ore by spectrophotometry with sulfosalicylic acid[J]. Metallurgical Analysis, 2014, 34(2), 74-78.
- 程涌,刘聪,吴伟,等.氩离子抛光-环境扫描电镜在页岩纳米孔隙研究中的应用—以辽中凹陷 JX 地区沙一段为例[J].电子显微学报,2018,37(01):52-58.
- CHENG Yong, LIU Cong, WU Wei, et al. The application of argon ion polishing-environmental scanning electron

- microscopy to the research on shale nanometer-sized pores: taking Sha-1 member in JX area as an example [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2018, 37(01): 52-58.
- 董会,曹佰迪,董敏,等.天然流体包裹体均一状态下拉曼光谱研究[J].西北地质,2021,54(4):274-279.
- DONG Hui, CAO Baidi, DONG Min, et al. Study on the Raman Spectra of Natural Fluid Inclusions Under Uniform State[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 274-279.
- 董会,李宏,王志海,等.应用有机包裹体研究天然气藏特征—以鄂尔多斯盆地苏里格气田西部山1段为例[J].西北地质,2016,49(2):248-256.
- DONG Hui, LI Hong, WANG Zhihai, et al. Application of Organic Fluid Inclusion to Study the Characteristics of Gas Reservoir Formation; Example from the Sulige Gas Field in Western Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(2): 248-256.
- 郭娟,闫卫东,徐曙光,等.中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J].地球学报,2021,(2):151-158.
- GUO Juan, YAN Weidong, XU Shuguang, et al. A Discussion on Evaluation Criteria and List of Critical Minerals in China [J], Acta Geoscientica Sinica, 2021, (2): 151-158.
- 何峻,李忠煜,赵江华,等. 氦罐顶气样品采集及保存有效期实验研究[J]. 岩矿测试,2018,37(2):159-163.
- HE Jun, LI Zhongyu, ZHAO Jianghua, et al. Study on Collection and Storage Stability Experiment of Helium Headspace Gas[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 159-163.
- 侯福良. 同位素分析测试简况[J]. 西北地质,1995,(03):32.
- Hiroaki Sato, 贺云龙. 玄武质岩石中橄榄石斑晶的 NiO - Fo 关系—原始岩浆组分的指示剂[J]. 世界地质, 1993, (1):48-49.
- 胡鑫蒙,苏文,原江燕,等.扫描电镜-拉曼光谱联机系统在地球科学中的应用[J].矿物岩石地球化学通报,2020,39(6):1095-1107+1065.
- HU Xinmeng, SU Wen, YUAN Jiangyan, et al. Application of the Raman Imaging and Scanning Electron Microscopy System in Earth Sciences[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(6): 1095-1107+1065.
- 黄方,南晓云.土壤中非传统稳定同位素研究进展[J]. 中国科学技术大学学报,2015,45(02):87-100.
- HUANG Fang, Nan Xiaoyun. Advance in applications of non-traditional stable isotopes in soil studies[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(02): 87-100.
- 黄方. 高温下非传统稳定同位素分馏[J]. 岩石学报,2011, 27(02):365-382.
- HUANG Fang. Non-traditional stable isotope fractionation at high temperatures [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(02): 365-382.
- 黄何何,孙倩倩,刘文菁,等. 土壤中持续性有机污染物分析技术研究进展[J]. 福建分析测试,2018,119(6):19-28.
- HUANG Hehe, SUN Qianqian, LIU Wenjing, et al. Research progress of analytical techniques for persistent organic pollutants in soil[J]. Fujian Analysis & Testing, 2018, 119(6): 19-28.
- 黄继武,李周.多晶材料 X 射线衍射-实验原理、方法与应用 [M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
- 贾双林,李长安.土壤中重金属有效态分析技术研究进展 [J]. 贵州地质,2021,38(1):79-84.
- JIA Shuanglin, LI Chang'an. Advances of Researches on Analytical Techniques for Available State Heavy Metals in Soil[J]. Guizhou Geology, 2021, 38(1): 79-84.
- 焦淑静,郑晓宇,陈海玲,等.一种聚合物水化分子形态的环境扫描电镜观测方法[J].电子显微学报,2014,33(05): 445-448.
- JIAO Shujing, ZHENG Xiaoyu, CHEN Hailing, et al. A method of observing molecule hydrate microstructure of polymer in ESEM[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2014, 33(05): 445-448.
- 靳梦琪,李艳广,王鹏,等. 榴石 LA - ICP - MS U - Pb 定年中元素分馏的影响及校正研究[J]. 岩矿测试,2020,39(2):274-284.
- JIN Mengqi, LI Yanguang, WANG Peng, et al. Element Fractionation and Correction Method for U - Pb Dating of Titanite by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasms-Mass Spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(2): 274-284.
- 黎卫亮,程秀花,张明祖,等.乙醇增强-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中镓铟铊铋[J]. 冶金分析,2014, 34(3):13-18.
- LI Weiliang, CHENG Xiuhua, ZHANG Mingzu, et al. Determination of gallium, indium, thallium, germanium and tellurium in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with ethanol as a signal enhancer[J]. Metallurgical Analysis, 2014, 34(3): 13-18.
- 李德鹏. 环境有机污染物监测发展趋势研究[J]. 科学传播, 2014,6(06):119+122.
- 李佳佳,李荣西,董会,等.应用显微激光拉曼光谱测定 CO₂ 气体碳同位素值¹³C₂ 的定量方法研究[J]. 光谱学与

- 光谱分析, 2017, 37(4): 1139-1144.
- LI Jiajia, LI Rongxi, DONG Hui, et al. Quantitative Approach to Determination of $\delta^{13}\text{C}$ Value of CO_2 with Micro-Laser Raman Spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1139-1144.
- 李荣西, 李佳佳, 董会, 等. 显微激光拉曼光谱测定二氧化碳碳同位素[J]. 分析试验室, 2015, 34(6): 645-649.
- LI Rongxi, LI Jiajia, DONG Hui, et al. Study on carbon isotope analysis in CO_2 by micro-laser raman spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2015, 34(6): 645-649.
- 李山坡, 许虹, 高迪, 等. 黑龙江金厂金矿钾长石的结构状态与温度及其成矿意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(1): 31-51.
- LI Shanpo, XU Hong, GAO Di, et al. Structure and Forming Temperature of K-feldspar and their Metallogenic Significance in the Jinchang Gold Deposit, Heilongjiang [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(1): 31-51.
- 李小明, 陶仁彪, 李清云, 等. 石榴子石 Fe^{3+} 含量电子探针原位分析: Flank Method 方法的实例应用[J]. 岩石学报, 2019, 35(04): 1058-1070.
- LI Xiaoli, TAO Renbiao, LI Qingyun, et al. Microprobe analysis of ferric iron in garnet: the flank method and case application [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(04): 1058-1070.
- 李晓斌, 陶明信. 地幔柱稀有气体同位素示踪研究的进展及其意义[J]. 地质通报, 2007, (12): 1605-1610.
- LI Xiaobin, TAO Mingxin. Progress in the research on noble gas isotope tracing of the mantle plume and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2007, (12): 1605-1610.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用 [J]. 地质学报, 2015, 89(12): 2400-2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(12): 2400-2418.
- 李艳广. 一种富 Hf 矿物或岩石进行 Hf 同位素分析及系统 [P]. 中国: ZL201810087759.6, 2021. 10. 19.
- 李忠煜, 李艳广, 黎卫亮, 等. 衍生化气相色谱-质谱法测定复垦土地样品中 19 种酚类污染物[J]. 岩矿测试, 2021, 40(2): 239-249.
- LI Zhongyu, LI Yanguang, LI Weiliang, et al. Determination of 19 Phenolic Pollutants in Reclaimed Land Samples by Derivation Gas Chromatography-Mass Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(2): 239-249.
- 李忠煜. 油气化探样品前处理条件对稠环芳烃测定结果的影响[J]. 岩矿测试, 2014, 33(3): 433-438.
- LI Zhongyu. Study on the Influence of Pre-treatment Conditions of Poly-nuclear Aromatic Hydrocarbons Samples of Geochemical Exploration for Oil and Gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(3): 433-438.
- 李忠煜. 油气化探样品酸解气中甲烷与氢气的相关性研究 [J]. 岩矿测试, 2018, 37(3): 313-319.
- LI Zhongyu. Research on the Correlation between Methane and Hydrogen in Acidhydrolyzed Gases for Geochemical Exploration Samples [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(3): 313-319.
- 刘国生, 朱光, 王道轩等. 合肥盆地东部朱巷组 X 射线衍射分析及其油气意义 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2003, 26(1): 32-36.
- LIU Guosheng, ZHU Guang, WANG Daoxuan, et al. Analysis of the Zhuxiang Formation in the eastern part of Hefei Basin by XRD and significance of the results in the light of oil and gas [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2003, 26(1): 32-36.
- 刘娇, 吴淑琪, 贾静, 等. 地质环境样品中挥发酚分析现状与进展 [J]. 分析测试学报, 2015, 34(3): 367-374.
- LIU Jiao, WU Shuqi, JIA Jing, et al. Review on Analytical Methods of Volatile Phenols in Geoenvironmental Samples [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2015, 34(3): 367-374.
- 刘崴, 胡俊栋, 杨红霞, 等. 电感耦合等离子体质谱联用技术在元素形态分析中的应用进展 [J]. 岩矿测试, 2021, 40(3): 327-339.
- LIU Wei, HU Jundong, YANG Hongxia, et al. Research Progress on Elemental Speciation Analysis by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry Hyphenated Techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(3): 327-339.
- 刘亚非, 王立社, 魏小燕, 等. 应用电子微探针-扫描电镜-拉曼光谱-电子背散射衍射研究一种未知 Ti-Zr-U 氧化物的矿物学特征 [J]. 岩矿测试, 2016, 35(01): 48-55.
- LIU Yafei, WANG Lishu, WEI Xiaoyan, et al. Study on the Mineralogical Properties of an Unknown Ti-Zr-U Oxide Using EPMA, SEM, Raman Spectroscopy and EBSD Techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(01): 48-55.
- 刘勇胜, 屈文俊, 漆亮, 等. 中国岩矿分析测试研究进展与展望 (2011—2020) [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(3): 515-539.

- LIU Yongsheng, QU Wenjun, QI Liang, et al., Advances and Perspectives of Researches on Rock and Mineral Analyses in China (2011—2020) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40 (3): 515-539.
- 刘玉灿,王颖,董金坤,等. 水中有机农药分析方法研究进展[J]. 分析测试学报,2020,39(05):140-148.
- LIU Yucan, WANG Ying, DONG Jinkun, et al. Research Progress on Determination Methods for Organic Pesticides in Water[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(05): 140-148.
- 刘粤惠,刘平安. X射线衍射分析原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2005.
- 马皓,王森,牛振川,等. 气溶胶稳定硫同位素研究进展[J]. 地球环境学报,2021,12(04):359-377.
- MA Hao, WANG Sen, NIU Zhenchuan, et al. Research progress on stable sulfur isotopes in aerosols[J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12(04): 359-377.
- 马锦龙,刘春艳,杨晓军,等. 稀有气体同位素地球化学研究的新领域、新动向[J]. 地质论评,2009,55(02):260-268.
- MA Jinlong, LIU Chunyan, YANG Xiaojun, et al. New Research Fields and New Development Tendency on Noble Gas Isotopic Geochemistry[J]. Geological Review, 2009, 55(02): 260-268.
- 屈文俊,吴晓军. 我国十年地质调查实验测试研究主要成果[J]. 岩矿测试,2012,31(2):201-209.
- QU Wenjun, WU Xiaojun. Major Achievements in Geoanalysis in the last 10 years[J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(2): 201-209.
- 屈文俊,王登红,朱云,等. 稀土稀有分散元素现代仪器测试全新方法的建立[J]. 地质学报,2019,93(6):1514-1522.
- QU Wenjun, WANG Denghong, ZHU Yun, et al. Establishment of new method for critical elements determination using modern analytical instruments[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1514-1522.
- 孙朝阳,董利明,贺颖婷,等. 电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中钪镓铟铊时的干扰及其消除方法[J]. 理化检验-化学分册,2016,52(9):1026-1030.
- SUN Chaoyang, DONG Liming, HE Yingting, et al. Elimination of Interferences in ICP-MS Determination of Sc, Ga, Ge, In, Cd and Tl in Geological Samples[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2016, 52(9): 1026-1030.
- 孙金凤,杨进辉,吴福元,等. 榍石原位微区 LA-ICPMS U-Pb 年龄测定[J]. 科学通报,2012,57(18):1603-1615.
- SUN Jinfeng, YANG Jinhui, WU Fuyuan, et al. In situ U-Pb dating of titanite by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(18): 1603-1615.
- 孙金凤,杨进辉. 含 U 副矿物的原位微区 U-Pb 定年方法[J]. 吉林大学学报(自然科学版),2009,39(4):630-649.
- SUN Jinfeng, YANG Jinhui. A Review of In-situ U-Pb Dating Methods for the Accessory U-Bearing Minerals[J]. Journal Of Jilin University (Nature Science Edition), 2009, 39(4): 630-649.
- 孙卫东,韦刚健,张兆峰,等. 同位素地球化学发展趋势[J]. 矿物岩石地球化学通报,2012,31(06):560-564.
- SUN Weidong, WEI Gangjian, ZHANG Zhaofeng, et al. Research Status and Advance in Isotope Geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(06): 560-564.
- 田立德,蔡忠银,邵莉莉,等. 亚洲季风区降水中稳定同位素气候意义研究进展[J]. 第四纪研究,2021,41(03):856-863.
- TIAN Lide, CAI Zhongyin, SHAO Lili, et al. Review on the study of climatic significance of precipitation isotope in Asian monsoon region [J]. Quaternary Studies, 2021, 41(03): 856-863.
- 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.
- WANG Shuangqing, SUN Weilin. A Review on Methodology in Oil and Gas Geochemical Exploration[J]. Rock and Mineral Analysis, 2005, 24(4): 271-276.
- 汪双双,韩延兵,李艳广,等. 利用 LA-ICP-MS 在 $16\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 激光束斑条件下测定独居石 U-Th-Pb 年龄[J]. 岩矿测试,2016,35(04):349-357.
- WANG Shuangshuang, HAN Yanbing, LI Yanguang, et al. U-Th-Pb Dating of Monazite by LA-ICP-MS Using Ablation Spot Sizes of $16\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$ [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(04): 349-357.
- 汪双双,黎卫亮,李艳广,等. 基于在线溶液校正法的 LA-ICP-MS 原位微区微量元素分析方法[P]. 中国:ZL201811606012.3,2021.8.3.
- 王洪兴,唐辉明,晏同珍. 小浪底库区庙上北滑坡滑带粘土矿物定向性的 X 射线衍射研究及其对滑坡的作用[J]. 矿物岩石,2004,24(2):26-29.
- WANG Hongxing, TANG Huiming, YAN Tongzhen. Study on x-ray diffraction for the orientability of clay minerals in sliding-soil in the Miaoshangbei landslide, Xiaolangdi reservoir area[J]. Journal of Mineralogy and

- Petrology, 2004, 24(2): 26-29.
- 王娟, 陈意, 毛骞, 等. 金红石微量元素电子探针分析[J]. 岩石学报, 2017, 33(06): 1934-1946.
- WANG Juan, CHEN Yi, MAO Qian, et al. Electron microprobe trace element analysis of rutile[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(06): 1934-1946.
- 王立成, 刘成林, 曹珂, 等. 沉积盆地卤水来源的非传统同位素示踪研究进展[J]. 矿床地质, 2014, 33(05): 909-920.
- WANG Licheng, LIU Chenglin, CAO Ke, et al. Progress in applying non-traditional isotopes to tracing origin of brines in sedimentary basins [J]. Mineral Deposits, 2014, 33(05): 909-920.
- 王晓琦, 金旭, 李建明, 等. 聚焦离子束扫描电镜在石油地质研究中的综合应用[J]. 电子显微学报, 2019, 38(3): 303-319.
- WANG Xiaoqi, JIN Xu, LI Jianming, et al. FIB-SEM applications in petroleum geology research[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(3): 303-319.
- 王羽, 汪丽华, 王建强, 等. 基于聚焦离子束-扫描电镜方法研究页岩有机孔三维结构[J]. 岩矿测试, 2018, 37(03): 235-243.
- WANG Yu, WANG Lihua, WANG Jianqiang, et al. Three-dimension Characterization of Organic Matter Pore Structures of Shale Using Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(03): 235-243.
- 王志海, 叶美芳, 董会, 等. 流体包裹体盐度低温拉曼光谱测定方法研究[J]. 岩矿测试, 2014, 33(6): 813-821.
- WANG Zhihai, YE Meifang, DONG Hui, et al. Study on Salinity Determination of Fluid Inclusions by Cryogenic Raman Spectroscopy[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(6): 813-821.
- 魏守才, 刘京涛, 夏江宝, 等. 基于氮氧同位素示踪的滨州市水体硝酸盐污染来源解析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 29-34.
- WEI Shoucai, LIU Jingtao, XIA Jiangbao, et al. Analysis of surface water and groundwater nitrate sources in Binzhou City in the Yellow River Delta using isotopes of nitrogen and oxygen[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(1): 29-34.
- 魏小燕, 周宁超, 王立社, 等. 含铀 Srilankite 的 EBSD 和 SAED 研究[J]. 电子显微学报, 2019, 38(03): 252-256.
- WEI Xiaoyan, ZHOU Ningchao, WANG Lishu, et al. EBSD and SAED study of the uranium-bearing Srilankite[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(03): 252-256.
- 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 121-129.
- WEN Ligang, ZENG Pusheng, ZHAN Xiuchun, et al. Application of the Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS) in the Identification of Rare Earth and Rare Minerals[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 121-129.
- 吴健, 沙晨燕, 李大雁, 等. 稳定碳同位素技术在多环芳烃源解析中的应用进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(03): 170-179.
- WU Jian, SHA Chenyan, LI Dayan, et al. Application of Stable Carbon Isotopic Ratio Measurement in Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(03): 170-179.
- 吴润秋, 饶灿, 王琪, 等. 关键金属铍的电子探针分析[J]. 科学通报, 2020, 65(20): 2161-2168.
- WU Runqiu, RAO Can, WANG Qi, et al. Electron probe microanalysis of the key metal beryllium[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(20): 2161-2168.
- 吴淑琪. 中国地质实验测试工作六十年[J]. 岩矿测试, 2013, 32(4): 527-531.
- 吴中贤, 陶东平. 云南某胶磷矿 AMICS 工艺矿物学研究及其难选机理探讨[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 503-511.
- WU Zhongxian, TAO Dongping. Mineralogical analysis of colophane in Yunnan using AMICS and exploration of difficult flotation mechanisms [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 503-511.
- 武丽艳. 稀有气体同位素地球化学在矿床学研究中的应用进展[J]. 岩石学报, 2019, 35(01): 215-232.
- WU Liyan. Advances of noble gas isotope geochemistry application in the study of ore deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(01): 215-232.
- 武鲁亚, 金之钧, 储著银, 等. 富有机质样品 Re-Os 同位素定年实验方法 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 513-523.
- WU Luya, JIN Zhijun, CHU Zhuyin, et al. Re-Os isotopic dating procedures for organic-rich samples[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 513-523.
- 夏芝广, 胡忠亚, 刘传, 等. 蒸发岩非传统稳定同位素研究综述[J]. 地学前缘, 2021, 28(06): 29-45.
- XIA Zhiguang, HU Zhongya, LIU Chuan, et al. Non-traditional stable isotope of evaporites [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(06): 29-45.

- 徐培苍,李如璧,王永强,等. 地学中的拉曼光谱[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社,1996.
- 徐向春,周斌,周雪航,等. 中国黄土高原沉积物稳定碳同位素指标在古植被环境研究中的进展[J]. 第四纪研究, 2021,41(04):931-947.
- XU Xiangchun, ZHOU Bin, ZHOU Xuehang, et al. A review for the stable carbon isotope proxies in the paleovegetation researches in the loess-paleosol deposits on the Chinese loess plateau[J]. Quaternary Studies, 2021, 41 (04): 931-947.
- 徐永昌,刘文汇,沈平,等. 天然气地球化学的重要分支—稀有气体地球化学[J]. 天然气地球科学,2003,(03): 157-166.
- XU Yongchang, LIU Wenhui, SHEN Ping, et al. An important branch of gas geochemistry-noble gas geochemistry [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, (03): 157-166.
- 杨兵. 地质研究中同位素示踪技术的应用[J]. 西部探矿工程,2021,(7):99-101.
- 杨家欢. 环境有机污染物监测发展趋势研究[J]. 资源节约与环保,2019,(3):41.
- 杨静洁,郭波莉. 稳定同位素在植物源性农产品产地溯源研究进展[J]. 核农学报,2020,34(S1):110-119.
- YANG Jingjie, GUO Boli. Recent Advanced in the Application of Stable Isotope in the Tracing the Geographical Origin of Plant-Derived[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(S1): 110-119.
- 姚修任,周继兴,尹明. 铈、铀、钍、钍、稀土元素的极谱吸附催化波研究 I. 铈的催化波及其在矿石分析中的应用[J]. 1981,9(1):22-26.
- 叶大年,金成伟. X 射线粉末法及其在岩石学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1984.
- 叶家瑜,江宝林. 区域地球化学堪查样品分析方法[M]. 北京:地质出版社,2004:3-180.
- 叶美芳,王志海,唐南安. 盐水溶液中常见阴离子团的激光拉曼光谱定量分析研究[J]. 西北地质,2009,42(03): 120-126.
- YE Meifang, WANG Zhihai, TANG Nan'an. Quantitative Analysis of Several Common Anions in Salt Solutions Using Laser Raman Spectrometer [J]. Northwestern Geology, 2009, 42(03): 120-126.
- 尹明. 我国地质分析测试技术发展现状及趋势[J]. 岩矿测试,2009,28(1):37-52.
- YIN Ming. Progress and Prospect on Geoanalytical Techniques in China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(1): 37-52.
- 于亮,朱亚林,闫昭胜,等. 环境扫描电镜在石油地质研究中的应用[J]. 电子显微学报,2016,35(6):561-566.
- YU Liang, ZHU Yalin, YAN Zhaosheng, et al. The application of ESEM to the study of the oil geology [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2016, 35(6): 561-566.
- 袁瑞丰,贾文雄,李宗省,等. 石羊河流域降水稳定同位素变化的区域差异[J]. 中国环境科学,2020,40(11): 4945-4956.
- YUAN Ruifeng, JIA Wenxiong, LI Zongsheng, et al. Precipitation stable isotope regional difference in Shiyang River basin[J]. China Environmental Science, 2020, 40 (11): 4945-4956.
- 张迪,陈意,毛骞,等. 电子探针分析技术进展及面临的挑战[J]. 岩石学报,2019,35(01):261-274.
- ZHANG Di, CHEN Yi, MAO Qian, et al. Progress and challenge of electron probe microanalysis technique[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(01): 261-274.
- 张慧,焦淑静,李贵红,等. 非常规油气储层的扫描电镜研究[M]. 北京:地质出版社,2016.
- 张勤. 浙江农业地质环境调查土壤样品中 54 种指标配套分析方案和分析质量监控系统[J]. 中国地质,2004,31 (S1):67-71.
- ZHANG Qin. A complete analytical scheme and an analytical data monitoring system for 54 components in soil samples of agrogeological environment surveys in Zhejiang Province[J]. Geology in China, 2004, 31 (S1): 67-71.
- 张然,叶丽娟,党飞鹏,等. 自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物鉴定和赋存状态研究中的应用[J]. 岩矿测试,2021,40(01):61-73.
- ZHANG Ran, YE Lijuan, DANG Feipeng, et al. Application of Automatic Mineral Analysis Technology to Identify Minerals and Occurrences of Elements in Sandstone-type Uranium Deposits in the Ordos Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(01): 61-73.
- 张文,李玉宏,王利,等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. 天然气地球科学,2018,29(02):236-244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(02): 236-244.
- 张文兰,车旭东,王汝成,等. 超轻元素铍的电子探针定量分析最佳条件探索:以绿柱石为例[J]. 科学通报,2020,65 (Z2):3205-3216.
- ZHANG Wenlan, CHE Xudong, WANG Rucheng, et al. Optimum conditions for quantitative analysis of beryllium by electron probe microanalysis: A case study of

- beryl[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65 (Z2): 3205-3216.
- 赵江华,李忠煜.加速溶剂萃取技术在油气化探样品稠环芳烃测定前处理中的应用[J].岩矿测试,2013,32(5): 791-795.
- ZHAO Jianghua, LI Zhongyu. Applications of Accelerated Solvent Extraction in Preparation of Poly-nuclear Aromatic Hydrocarbons in Oil and Gas Geochemical Exploration Samples[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(5): 791-795.
- 赵江华,王鹏,黎卫亮,等.复垦土地样品中石油类物质加速溶剂萃取-荧光分光光度法分析方法研究[J].岩矿测试,2021,40(3):375-383.
- ZHAO Jianghua, WANG Peng, LI Weiliang, et al. Determination of the Petroleum Substances in Samples of Reclaimed Land by Fluorescence Spectrophotometry with Accelerated Solvent Extraction[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(3): 375-383.
- 赵新苗,唐索寒,李津,等.钛同位素地球化学综述[J].地学前缘,2020,27(03):68-77.
- ZHAO Xinmiao, TANG Suohan, LI Jin, et al. A review of titanium isotope geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(03): 68-77.
- 周剑雄,毛水河.电子探针分析[M].北京:地质出版社,1988.
- 周宁超,刘亚非,魏小燕,等.南阿尔金地区含铀-富铀锆钛石的发现及其新成因机制[J].科学通报,2019,64(26): 2717-2727.
- ZHOU Ningchao, LIU Yafei, WEI Xiaoyan, et al. Discovery of uranium-bearing srilankite and a new genetic mechanism in South Altyn Tagh[J]. China Chinese Science Bulletin, 2019, 64(26): 2717-2727.
- 周秋石,王瑞.氯同位素地球化学研究进展[J].地学前缘,2020,27(03):42-67.
- ZHOU Qiushi, WANG Rui. Advances in chlorine isotope geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(03): 42-67.
- 朱丹,桂博艺,王芳,等. AMICS 测试技术在铌矿中的应用—以竹溪铌矿为例[J].有色金属(选矿部分),2021, (3):1-7.
- ZHU Dan, GUI Boyi, WANG Fang, et al. Application of the Advanced Mineral Identification and Characterization System (AMICS) in the Nb Deposit: A Case Study of the Zhuxi Nb Deposit[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021, (3): 1-7.
- 朱金,周豹,秦志军,等.湖北省随县王家台金多金属矿石英 Rb - Sr 同位素定年及成因探讨[J].资源环境与工程,2021,35(3):308-312.
- ZHU Jin, ZHOU Bao, QIN Zhijun, et al. Rb - Sr Isotopic Dating and Genesis of Wangjiatai Gold Polymetallic Ore in Suixian County, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(3): 308-312.
- 朱祥坤,王跃,闫斌,等.非传统稳定同位素地球化学的创建与发展[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(06): 651-688.
- ZHU Xiangkun, WANG Yue, YAN Bin, et al. Developments of Non-Traditional Stable Isotope Geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(06): 651-688.
- Alexander S, Sarah G, Renee T, et al. In-situ Lu Hf geochronology of garnet, apatite and xenotime by LA ICP MS/MS[J]. Chemical Geology, 2021, 577: 120299. Doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120299.
- Burke E A J. Raman microspectrometry of fluid inclusions[J]. Lithos, 2001, 55: 139-158.
- Cheng L, Zhang C, Li X, et al. Improvement of Electron Probe Microanalysis of Boron Concentration in Silicate Glasses[J]. Microscopy and Microanalysis. 2019, 25(4): 874-882.
- Cui J Q, Yang S Y, Jiang S Y, et al. Improved Accuracy for Trace Element Analysis of Al and Ti in Quartz by Electron Probe Microanalysis[J]. Microscopy and Microanalysis, 2019, 25(1): 47-57.
- Eduardo N, Tiago J, Fernanda G, et al. Partial melting and subduction-related metasomatism recorded by geochemical and isotope (He - Ne - Ar - Sr - Nd) compositions of spinel lherzolite xenoliths from Coyhaique, Chilean Patagonia[J]. Gondwana Research, 2021, 98: 257-276. Doi: 10.1016/j.gr.2021.06.003.
- Greenman J W, Rooney A D, Patzke M, et al. Re - Os geochronology highlights widespread latest Mesoproterozoic (ca. 1090 - 1050 Ma) cratonic basin development on northern Laurentia[J]. Geology, 2021, 49(7): 779-783. Doi: 10.1130/G48521.1.
- Hanyu T, Tatsumi Y, Kimura J I. Constraints on the origin of the HIMU reservoir from He - Ne - Ar isotope systematics[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011, 307(3-4): 377-386.
- Höfer H E, Brey G P, Schulz-Dobrick, et al. The determination of the oxidation state of iron by the electron microprobe[J]. European Journal of Mineralogy, 1994, 6: 407-418.
- Jnf A, Fpa B, Fan Y C, et al. Integration of zircon and apatite U - Pb geochronology and geochemical mapping of the Wude basalts (Emeishan large igneous province): A

- tool for a better understanding of the tectonothermal and geodynamic evolution of the Emeishan LIP[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(2): 573-585.
- Katrin W, Michael W, Martina M, et al. Diagenetic stability of non-traditional stable isotope systems (Ca, Sr, Mg, Zn) in teeth – An in-vitro alteration experiment of biogenic apatite in isotopically enriched tracer solution-ScienceDirect[J]. *Chemical Geology*, 2021, 572: 120196. Doi: 10.1016/j.chemgeo. 2021.120196.
- Li J X, Yue L P, Roberts A P, et al. Global cooling and enhanced Eocene Asian mid-latitude interior aridity[J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9, 3026. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05415-x>
- LI Xiaoli, TAO renbiao, LI Qingyun, et al. Microprobe analysis of ferric iron in garnet: The Flank Method and case application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35 (04): 1058-1070.
- Li X Y, Zhang C, Behrens H, et al. Calculating amphibole formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression[J]. *Lithos*, 2020a, 362-363: 1-13.
- Li X Y, Zhang C, Behrens H, et al. Calculating biotite formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression[J]. *Lithos*, 2020b, 356-357: 1-10.
- Olierook H, Kai R, Ulrich S, et al. Resolving multiple geological events using in situ Rb – Sr geochronology: implications for metallogenesis at Tropicana, Western Australia[J]. *Geochronology*, 2020, 2(2): 283-303.
- Peng Gao, Chris Yakymchuk, Jian Zhang, Changqing Yin, Jiahui Qian, Yanguang Li. Preferential dissolution of U-rich zircon biases the Hf isotope compositions of granites[J]. *Geology*, 2021. Doi: 10.1130/G49656.1.
- Roedder E. Fluid inclusion analysis—Prologue and epilogue [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54: 495-507
- Segvic B, Slovenec D, Schuster R, et al. Sm – Nd geochronology and petrologic investigation of sub-ophiolite metamorphic sole from the Dinarides (Krivaja-Konjuh, Ophiolite Complex, Bosnia and Herzegovina)[J]. *Geologia Croatica*, 2020, 73(2): 119-130.
- Sobolev VA, Hofmann WA, Dmitry VK, et al. The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts[J]. *Science*, 2007, 316: 412-417
- Su B, Chen Y, Mao Q, et al. Minor elements in olivine inspect the petrogenesis of orogenic peridotites [J]. *Lithos*, 2019, 344-355: 207-216
- Takahashi H, Mcswiggen P, Nielsen C. A unique wavelength dispersive soft X-ray emission spectrometer for electron probe X-ray microanalyzers [J]. *Microscopy and Analysis*, 2014, 15: 5-8.
- Vincenzo G D, Folco L, Suttle M D, et al. Multi-collector $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of microtektites from Transantarctic Mountains (Antarctica): a definitive link with the Australasian tektite/microtektite strewn field[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021. Doi: 10.1016/j.gca. 2021.01.046.
- Wang XJ, Wu K, Huang WX, et al. Study on fracture behavior of particulate reinforced magnesium matrix composite using in situ SEM[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(11-12): 2253-2260.
- Yanguang Li, Shuguang Song, Xiaoyong Yang, Zi – Fu Zhao. Age and composition of Neoproterozoic diabase dykes in North Altyn Tagh, northwest China: implications for Rodinia break-up[J]. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2020.1857851.
- Yurchenko A, Voropaev A, Kozlova E, et al. Application of the Data on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Carbonates for the Study of Unconventional Reservoirs on the Example of the Bazhenov Source Rocks, Western Siberia, Russia[J]. *Geosciences (Switzerland)*, 2021, 11(7): 264.
- Zhang C, Almeev R R, Hughes E C, et al. Electron microprobe technique for the determination of iron oxidation state in silicate glasses [J]. *American Mineralogist*, 2018, 103(9): 1445-1454.