

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

微量样品 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 联合分离流程

储著银*, 杨岳衡, 杨蔚, 彭澎

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

建立了一种多柱联合从月球玄武岩等珍贵样品中快速分离出 U、Pb、Rb、Sr、Sm、Nd、Lu、Hf 等元素的方法, 应用于 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 等同位素分析, 并预留 Ca、Ba、Fe-Mg-Cr-Ti-K 等元素供金属稳定同位素分析。样品加 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 稀释剂后, 采用 HF-HNO₃ 溶解并转化为溶于 1.1 M HBr 的样品溶液后, 首先采用微型阴离子交换柱(0.1 mL Eichrom 1-X8 树脂, 200~400 目; 柱内径~3 mm)分离 Pb 与其它元素; Pb 一般需要进行二次过柱纯化。第二步采用小型化阳离子交换柱(0.25 mL AG50W-X12 树脂, 200~400 目; 柱内径 4 mm)将样品元素分离为三组: (1) Fe、Mg、Cr、Ti、K 等主量元素及 U、Hf 等元素; (2) Rb, 可供质谱测定; (3) Sr、Ca、Ba、REE 等元素。第三步采用 Sr 特效柱(0.5 mL Sr 树脂, 100~150 微米; 柱内径~6.4 mm)分离 Sr、Ba、Ca-REE; Sr 可供 TIMS

测定; Ba 预留。第四步采用 P507 树脂柱(1.7 mL 树脂, 粒径~100~150 μ m; 柱内径~7.4 mm)分离 Ca、Sm、Nd、Lu; Sm、Lu 可分别供 TIMS 与 MC-ICP-MS 测定; Ca 预留; 由于采用 TIMS NdO₂法测定 Nd 同位素, Nd 进一步采用 TODGA 柱(1 mL 50-100 μ m 树脂; 柱内径 7.4 mm)分离 Pr-Nd。第五步采用 TODGA 柱(1 mL 50-100 μ m 树脂; 柱内径 7.4 mm)分离 Fe-Mg-Cr-Ti-K 等主元素、U 和 Hf; U、Hf 可供 MC-ICP-MS 测定; Fe-Mg-Cr-Ti-K 等主元素预留。所建立流程具有分离速度快, 流程本底低的特点。通过对 USGS BHVO-2(称样量~3 mg)进行 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd 及 Lu-Hf 同位素分析, 验证了分离流程的有效性。

关键词: 化学分离流程; Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf、U-Pb; 微量样品; 同位素分析

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

金红石微区原位 U-Pb 定年时鉴别其同质异象矿物的 重要意义及方法

张永清^{1*}, 周红英^{1,2}, 耿建珍^{1,2}, 涂家润^{1,2}, 毕君辉^{1,2}, 李国占^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170

近年来, 国内外对金红石展开了大量的在方法上与锆石类似的微区原位 U-Pb 同位素定年研究。进行单矿物微区原位 U-Pb 定年时首先要明确用于定年的矿物。在进行金红石(TiO_2)微区原位 U-Pb 定年时, 主要依据电子探针数据, 结合阴极发光图像确定为金红石。然而金红石不同于其他如锆石、独居石等定年矿物, 金红石与锐钛矿、板钛矿为 TiO_2 的同质异象矿物, 化学成分均为 TiO_2 , 电子探针数据并不能有效区分; 本文作者在进行 TiO_2 同质异象矿物的研究中发现, 除具有典型晶型特征的金红石、锐钛矿和板钛矿颗粒, 大部分矿物颗粒其阴极发光图像并无明显区别; 因此, U-Pb 定年时常用的电子探针数据及阴极发光图像并不能有效区分三者。金红石、锐钛

矿和板钛矿形成环境、温度、压力等均不同, 代表了不同的地质环境, 如果研究样品中同时存在三种或者其中两种矿物, 得到的年龄将是混合年龄, 其指示的地质意义值得商榷。因此, 快速准确地鉴别金红石及其同质异象矿物非常重要。作者将激光拉曼光谱应用于 TiO_2 同质异象矿物的鉴别中, 快速准确的鉴别 TiO_2 同质异象矿物, 同时可识别出矿物之间发生的相变, 为金红石 U-Pb 定年时矿物的鉴别提供了新思路, 进而为提高金红石 U-Pb 定年数据准确性提供基础保障。

关键词: U-Pb 定年; 金红石; 同质异象矿物; 鉴别

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

微区原位橄榄石 Fe-Mg 同位素参考物质研制

曾显丽, 李明*, 张文*

中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

橄榄石作为重要造岩矿物, 其 Fe-Mg 稳定同位素特征为揭示关键地质过程提供了重要示踪依据。激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)原位分析技术虽能有效解析橄榄石生长环带同位素分异特征, 但基体匹配标准物质的缺失长期制约该技术的发展。本研究创新性结合超细粉末制备与固相烧结技术, 成功研制适用于 Fe-Mg 同位素分析的橄榄石标准物质 CUG-OL-Ar。通过物相表征证实合成样品完整保持了原始化学组成, 其激光剥蚀行为稳定, 信号曲线平滑。方差分析(ANOVA)表明不同批次样品 Fe-Mg 同位素组成均一性良好($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}} = 0.00\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$, $\delta^{25}\text{Mg}_{\text{DSM-3}} = 0.00\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, 2SD,

$n=350$)。基于溶液法 MC-ICP-MS 系统定值, 并依据 ISO GUIDE (2017) 规范计算不确定度, 最终标定 CUG-OL-Ar 的 $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ 和 $\delta^{25}\text{Mg}_{\text{DSM-3}}$ 值分别为 $0.00\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD), $0.00\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ (2SD)。通过将该标准物质作为外标进行多类型样品 Fe-Mg 同位素 LA-MC-ICP-MS 分析验证, 测试结果与推荐值高度吻合, 充分证明 CUG-OL-Ar 的均一性与稳定性。本研究为矿物微区同位素分析提供了关键标准物质支撑, 对深化岩浆演化与地幔过程研究具有重要意义。

关键词: 橄榄石; 参考物质; 微区分析; 铁-镁同位素

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFA0708401)

第一作者简介: 曾显丽 (1996-), 博士研究生; 研究方向: 微区原位同位素方法开发。Email: Zengxianli5678@outlook.com

*通信作者简介: 李明 (1982-), 高级工程师; 研究方向: 金属稳定同位素分析方法开发 Email: liming19820426@163.com

*通信作者简介: 张文 (1985-), 副研究员; 研究方向: 微区原位等离子体质谱新技术和新方法开发研究。Email: tuyaken@hotmail.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

O-PTIR 揭示沉积有机质化学官能团结构和分布非均质性

王瑞林*, 高和婷, 陈思钰, 徐镓, 李济远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

原油热裂解是超深层非常规油气成藏与勘探的关键科学问题。在自然界中, 石油和周围环境的复杂成分、变化的温度和时间(T-T)以及复杂的地质演化历史使揭示石油裂解的热演化机制变得具有挑战性。其中, T-T 是控制有机质热演化的两个最重要的因素。温度不仅控制裂化反应速率, 还决定反应途径和产物。随着 T-T 的增加, 热演化的程度不断加深, 导致碳氢化合物歧化。低热稳定性烃类经历 C-S、C-O 和 C-C 键的裂解, 产生小分子烃(C1-C5)。同时, 沥青质和多环芳烃(PAHs)等热稳定化合物会发生脱甲基和环化反应, 形成可以保存在储层中的固体沥青。本研究创新性应用亚微米分辨率光学光热红外光谱(O-PTIR)技术, 首次实现了轻质油热解过程中有机质官能团组成及化学非均质性的原位动态解析。实验结果表明, 随热成熟度(EasyRo)升高, 残油组分呈现显著演化规律: 饱和烃占比持续下降, 芳烃组分逐渐主导。非烃与沥青质含量在 EasyRo=1.5%~1.8% 区间达到峰值后回落, 而多环芳烃(PAHs)环数从低成熟度(EasyRo=1.81%)的 2 环结构演变为高成熟度(EasyRo=2.40%)的 4-5 环稠合形式。O-PTIR 光谱特征显示, 脂肪族结构(C-H, 1450-1350 cm^{-1})与芳香

族 C=C(1600 cm^{-1}) 振动强度随成熟度增加呈负相关, 证实了脂肪族向芳香化结构的转化机制。同时, C=O(1720 cm^{-1}) 与 C-S(1250 cm^{-1}) 振动的阶段性富集揭示了脱甲基化与环化反应的分子路径差异。

微观形貌分析表明, 固体沥青含量随成熟度升高从 12% 增至 35%, 其结构由松散粉状(EasyRo=1.2%)逐渐致密化为碎片状(EasyRo=2.40%)。化学非均质性在 EasyRo=2.40% 时达到峰值, 表现为脂肪族化合物呈脉状穿插于芳香基质中。Pseudo-van Krevelen 分析计算不同官能团参数比, 表征含氧量、饱芳比和分支比。以此进一步量化了演化路径: 早期(EasyRo<1.5%)含氧官能团分解导致 C 因子降低, 中期(EasyRo=1.5%~2.0%)脂肪链裂解引发 A 因子下降, 而 B 因子的剧烈波动揭示了多环芳烃缩合与杂原子重排的协同作用。参数对比和 Pseudo-van Krevelen 分析进一步表明, 原油热裂解过程中残留的有机物不是均匀的, 而是区域性的。在微观尺度上理解这些分子和化学非均质性对于阐明超深轻质油的迁移、分馏和转化过程至关重要。

关键词: O-PTIR; 原油热裂解; 固体沥青

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

水中溶解性 He 同位素组成及含量测定

张建锋, 刘汉彬*, 李军杰, 张佳, 金贵善, 韩娟, 石晓

核工业北京地质研究院 稳定及稀有气体同位素研究室, 北京 100029

氦气在军工、航天、核工业、医学、低温科学等高科技领域具有广泛应用, 是一种关系国家安全和高新技术发展的稀缺战略资源。水中溶解性 He 在核电、地热、地震监测、地球化学示踪及环境指示中具有重要作用, 为此开展了水中溶解性 He 同位素组成及含量测定研究工作。实验方法流程包括以下几个步骤: 样品采集及预处理: 样品采集包括空气饱和水制备以及待分析水样品采集, 两种水均封存于经过真空退火处理的无氧铜管内。在配备压力计的恒温箱内向装满三级纯度水的玻璃水槽内通过膜片泵连续泵入空气, 使水中溶解气体与空气充分交换达到平衡, 并密封至铜管内, 完成空气饱和水样品制备。对于水样品的采集则需根据水体环境选择相应的取样方式, 将纯水样品封存于铜管内, 称量装满水样的铜管质量。本底测量: 在铜管样品释放前, 按照样品释放、干燥、纯化、分离提取流程, 测量全流程本底, ^4He 全流程本底应低于 $1.0 \times 10^{-15} \text{ mol}$ 。

样品溶解性 He 提取、纯化、同位素组成测试: 全流程本底满足要求后, 在真空条件下将铜管样品压开并充分释放, 水蒸气和分离出的溶解 He 气通过不锈钢毛细管进入气体纯化系统。气体经玻璃冷阱和充

填分子筛的不锈钢冷阱冷冻后, 再经过充填分子筛的干燥器进行干燥。用低温冷泵冷冻除 He 以外的其他气体, 将稀有气体同位素质谱仪调至 He 同位素测试参数, 分别用法拉第杯和电子倍增器对 ^4He 和 ^3He 进行同时接收。将 He 气扩散至稀有气体同位素质谱仪, 进行 He 同位素组成测定, 获得样品中 ^4He 和 ^3He 的离子流强度。将释放水的铜管拆离系统, 充分烘干后称量采样铜管的质量, 从而确定所分析样品水的质量。每件样品测试完成后, 按相同分析流程对空气饱和水和水中溶解性 He 同位素离子流强度进行测定。数据处理及精密度: 空气中 He 同位素值与空气饱和水中溶解 He 的同位素值相比较得到质量歧视校正因子。测量的水中溶解性 He 同位素比值需经质量歧视校正因子修正。水中溶解性 He 含量通过空气饱和水的质量、He 含量、离子流强度值以及样品的质量、样品离子流强度值计算获得。空气饱和水中 He 同位素及含量平行测量 5 次, 同位素测试精密度优于 0.6%, 含量测试精密度优于 1%。

关键词: 氦同位素; 氦含量; 稀有气体;

基金项目: 核能开发项目“塔里木盆地砂岩铀矿元素-同位素地球化学预测方法研究”(测 HTLM2101-06)

第一作者简介: 张建锋 (1978-), 正高级工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hdyzjf@163.com

*通信作者简介: 刘汉彬 (1969-), 正高级工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hanbinliu@sina.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

不同比值的锂同位素标准物质研制初步研究

程原原¹, 宋盼淑², 金章东¹, 任同祥², 李峥岩¹, 邓丽¹, 贺茂勇^{1*}

1. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国计量科学研究院, 北京 100029

标准物质是建立化学测量量值溯源体系的必要手段, 是分析测试中质量控制的重要环节, 是检测结果准确的基本保证, 同时也是国家中长期科学和技术发展规划的重要内容之一。锂 (Li) 同位素作为“非传统稳定同位素”家族成员, 近年来已经成为同位素地球化学热门领域和前沿之一。锂同位素标准物质是保证测量结果准确性的基础, 加上上世纪八十年代, 锂同位素在核方面的重要性, 其研制受到国际社会的重视。目前, 国际上通用的 Li 同位素标准参考物质有两种, 一种是美国国家标准局 (NIST) 提供的高纯碳酸锂样品 L-SVEC, 另一种是欧共体核测量中心局 (CBNM) 研制的 IRMM-016 (纯碳酸锂)。在过去较长时间里, 国际实验室采用的 Li 同位素标准主要是以上 2 种, 且同位素值单一。随着高精度同位素测定仪器的发展、测试方法的提高、研究领域的拓展, 在实验室检测过程中, 发现单一同位素标准物质已经不能满足实际测定需求。本申请拟采用同位素稀释法, 将购置于青海盐湖集团的 Li_2CO_3 作为基础样品源, 高浓缩的富含 ^6Li 的 LiCl 以及 ^7Li 的 Li_2CO_3 作

为稀释剂。首先对上述稀释剂进行溶解浓缩, 通过使用 ICP-MS、ICP-OES 对上述溶液进行测试, 判断其化学纯度以及浓度, 通过使用 MC-ICP-MS 对上述标准物质溶液进行锂同位素丰度比测试, 确定其同位素组成。在上述基础上制定不同同位素比值范围标准溶液配制方法, 包括正值 (约 38‰~42‰)、零值 (约 -2‰~+2‰)、负值 (约 -38‰~-42‰)。上述标准溶液配制完成后, 充分混合均匀并分装至提前洗净的高密度聚乙烯小瓶中, 每种同位素比值溶液分装 1000 瓶, 每瓶 5 mL, 浓度 1000×10^{-6} , 使用 2% 硝酸介质。按照标准物质研制的流程和方法, 目前正在对不同比值的锂同位素样品均一性、长期稳定性进行分析。并联合国内外知名实验室进行比对, 目前已经收到部分测试结果, 下一步争取完成定值分析并评价不确定度, 达到国家标准物质研制要求, 并向国家标准物质中心提交标准物质申请, 争取未来成为国家标准物质。

关键词: 锂同位素; 标准物质; 标准值; 研制; 定值

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42403030, 42173023); 黄土科学全国重点实验室开放课题 (SKLLQGPY2410); 中国科学院兰州区域中心开发技术创新项目 (LZ2024g104)

第一作者简介: 程原原 (1989-), 助理工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: chengyy@ieecas.cn

*通信作者简介: 贺茂勇 (1979-), 研究员; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hemy@ieecas.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于带间级联激光器技术检测二氯乙烷和氯化钠中氯同位素丰度

朱地^{1*}, 金彪¹, 史哲², 谢灵²

1. 南京大学 能源与资源学院, 江苏 苏州 215163;

2. 苏州冠德能源科技有限公司 仪器研发部, 江苏 苏州 215163

本文采用带间级联激光器作为光源, 空心波导管作为气体吸收池, 配合中红外探测器等配件, 制作出用于检测 HCl 气体氯同位素比值 ($\delta^{37}\text{Cl}$) 的光谱仪。光谱仪检测 HCl 气体氯同位素值偏差不超过 1 permil, 稳定性较好; 光谱仪配合加氢炉和色谱仪, 检测二氯乙烷中氯同位素, 经测试, 二氯乙烷样品的检测浓度极限约 2 g/L; 光谱仪配合自制反应容器, 将 NaCl 与浓硫酸在

反应容器中反应生成 HCl 气体, 再由光谱仪进行检测, 经检测, 两组 NaCl 样品中, 第一组样品稳定性较差, 说明仪器存在 HCl 气体吸附问题, 第二组数据稳定性较好, 相对标准偏差仅 0.139。

关键词: 带间级联激光; 空心波导管; 氯代烃; 氯同位素

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

碱性岩中石榴石激光微区 U-Pb 定年与 Sm-Nd 同位素分析

杨岳衡^{1*}, 吴福元¹, Roger H. Mitchell², 赵晗¹, 吴石头¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

2. Lakehead University, Thunder Bay, ON P7B 5E1, Canada 888888

碱性岩通常与战略性关键金属（锆、钪、铌、稀土等）矿产资源密切相关，含钛钙铁榴石（Ti-bearing andradite）是硅不饱和火成岩中的常见矿物与特征矿物，如碱性正长岩、霞石正长岩、响岩、霞石岩、黄长岩等常见含钛钙铁榴石。此外，与硅不饱和碱性岩浆相关的热液蚀变系统或矽卡岩中也多见含钛钙铁榴石。通常根据钛含量（1%~20%）高低不同，含钛钙铁榴石分别称之为黑榴石（Melanite）、钛榴石（Schorlomite）、钙钛榴石（Morimotoite）。开展含钛石榴石的研究可以反映岩浆的二氧化硅浓度与氧逸度，其富集锆、钪、铌、稀土和铀等高场强元素特征来研究岩浆的分离结晶，较高铀钍含量和较低的普通铅组成，其铀铅年龄为不饱和岩石的侵位时代及地球化学演化提

供制约。本工作中，我们建立了含钛钙铁榴石激光微区 U-Pb 和 Sm-Nd 同位素分析方法，在研发石榴石 U-Pb 定年与 Sm-Nd 同位素分析微区标准物质的基础上，对来自加拿大 Prairie Lake 和 Ice River、美国 Magnet Cove、瑞典 Alnö、挪威 Fen、俄罗斯 Ozernaya 和 Ural、中国紫金山、矾山与水泉沟、摩洛哥 Tamazert、意大利 San Ieo、德国 Kaiserstuhl、瑞士 Schaffhausen 等 14 个典型碱性岩中的石榴石样品，开展了主微量测试、U-Pb 定年和 Sm-Nd 同位素分析。我们的工作对碱性杂岩相关的成矿年代学与同位素地球化学研究具有重要意义。

关键词：碱性岩；石榴子石；U-Pb 定年；Sm-Nd 同位素；激光微区

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

七种玻璃标样 (OJY-1、OH-1、OA-1、CGSG-1、CGSG-2、CGSG-4 和 CGSG-5) 的锂和硼同位素比值: 用于原位 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 分析的新标样

李建辉, 吴石头*, 杨岳衡

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

锂和硼同位素地球化学广泛应用于地球科学领域。锂和硼同位素比值的原位微区分析需要基质匹配的标样来进行仪器分馏校准、方法验证和实验室间数据比较。在本研究中, 我们对七种玻璃标样 OJY-1、OH-1、OA-1、CGSG-1、CGSG-2、CGSG-4 和 CGSG-5 的 Li 和 B 同位素比 ($\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$) 进行了详细表征。通过对不同颗粒的 LA-MC-ICP-MS ($n = 80\sim 100$) 和 SIMS ($n = 8\sim 12$) 多点分析, 发现这在 $10\sim 120\ \mu\text{m}$ 空间分辨率下七个标样的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值均一。这些标样的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 的 2SD 在 $0.4\text{‰}\sim 1.5\text{‰}$ 之间。 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 的推荐值是用溶液 MC-ICP-MS 技术获得。来自多家独

立实验室的数据偏差在 $\sim 1.50\text{‰}$ 以内。7 个玻璃中 Li 和 B 的含量变化比较大从 $\sim 40\ \mu\text{g/g}$ 到 $2000\ \mu\text{g/g}$ 和 $\sim 40\ \mu\text{g/g}$ 到 $5000\ \mu\text{g/g}$ 。7 个玻璃的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值也各不相同。 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值的范围分别为 $+0.99\text{‰}\sim +5.69\text{‰}$ 和 $-10.92\text{‰}\sim +0.25\text{‰}$ 。值得注意的是, OA-1 和 OH-1 是高硅玻璃 ($\text{SiO}_2 > 75\%$), 有助于研究高度演化岩浆岩的锂和硼同位素地球化学。本次研究的 7 个玻璃标样可作为现有锂和硼同位素比值标样的重要补充。

关键词: 锂同位素地球化学; 硼同位素地球化学; 玻璃标准物质; LA-MC-ICP-MS; 原位微量分析

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42273034); 中国科学院青年创新促进会项目 (2020068, 2022066)

中国科学院地质与地球物理研究所重点研究项目 (IGG-CAS-2-21-1 和 IGG-CAS-202204); 中国科学院战略先导科技专项 (B 类) (XDB0710000); 意大利 MUR PRIN2022 (2022CX5AK9; 简称 AWARE)

第一作者简介: 李建辉 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 分析地球化学。Email: lijianhui23@mailsucas.ac.cn

*通信作者简介: 吴石头 (1987-), 高级工程师; 研究方向: 分析地球化学。Email: shitou.wu@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

含铀副矿物 ID-TIMS U-Pb 定年关键问题及思考

涂家润*, 周红英, 耿建珍, 李国占

中国地质调查局天津地质调查中心 (华北地质科技创新中心), 天津 300170

同位素稀释-热电离质谱 (ID-TIMS) U-Pb 定年技术具有高精度高准确度、无需矿物标样校正的优点, 在精细地层年代学、矿物标样研制等研究中具有重要作用。该方法通常先分选出单矿物, 再用酸溶解后通过离子交换柱来分离提纯 U 和 Pb, 最后混合磷酸-硅胶后转移到金属铯灯丝上进行热电离质谱测定。与微区原位 U-Pb 定年技术 (激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法、二次离子质谱法) 相比, ID-TIMS 虽然化学前处理流程复杂, 较为费时费力, 但是具有单点测定精度较高, 可测定的矿物年龄范围较广, 并且无需基体匹配的矿物标样校正的优点, 避免了寻找和制备理想矿物标样的困难。自 1973 年 Krogh 开发了高温高压下采用 HF 溶解锆石的技术以来, ID-TIMS 在 U-Pb 年代学领域取得了一系列重要进展。该方法结合空气磨蚀或化学溶蚀的矿物预处理技术, 能有效克服颗粒表面乃至内部 Pb 丢失的影响, 所得年龄更为谐和, 可实现单颗粒锆石 U-Pb 年龄测

定。2003 年, 国际上地质年代学组织地时 (Earthtime) 成立, 加速了 ID-TIMS 高精度 U-Pb 定年技术发展进程。近些年, 随着超净实验室 Pb 流程本底的下降以及 Earthtime 稀释剂的应用, ID-TIMS 锆石 U-Pb 定年精度可达 0.1 %, 已成为生物演化、地层划分和对比以及与其他定年标尺相互校正等研究的重要工具。ID-TIMS 是一种不可替代的具有测量绝对量的方法, 所有矿物微区原位 U-Pb 定年标样的参考年龄必须由 ID-TIMS 测定。本实验室在颗粒锆石 ID-TIMS U-Pb 定年的基础上, 发展了锡石、金红石、铀矿、氟碳铈矿、铌铁矿、独居石、磷灰石等含铀副矿物 ID-TIMS U-Pb 定年技术, 极大地拓展了 ID-TIMS U-Pb 定年技术的使用范围, 为诸多副矿物微区原位 U-Pb 定年标样研发提供了重要技术支撑。

关键词: ID-TIMS; 稀释剂; 标样; 高精度; U-Pb 定年

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

非接触式亚微米分辨红外拉曼联用系统在非常规油气研究中的应用

朱光有*, 陈思钰, 贾凡琛, 张杰志

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

对小分子烃类微观赋存特征的精准解析和有机质分子结构的定量研究, 对非常规油气(如页岩气、致密油、煤岩气等)的勘探与开发具有重要意义。传统表征技术受限于分辨率不足或单一尺度的观测, 难以全面揭示复杂孔隙网络和干酪根原位生排烃过程。本研究引入国际前沿的非接触式亚微米分辨红外拉曼联用系统(O-PTIR), 该技术作为一种快速、简单的非接触式光学方法, 突破了传统红外光谱的衍射极限。O-PTIR 通过检测样品表面因本征红外吸收引发的快速的光热膨胀或收缩信号, 解决了传统红外与拉曼光谱的诸多技术难题。结合高温高压热模拟装置, 该系统可以原位、连续地揭示等效温压场页岩生排烃过程中干酪根裂解、油气生成和显微组分演化的分子结构及空间分布差异。页岩生油过程的解析需依托对热演化过程中有机质微观化学结构与物理性质差异的分析。然而, 有机质的演化过程受母质来源的化学分子结构影响, 这导致在页岩沉积有机物呈现非均质性。长江大学地球科学学院新引进了一台非接触式亚微米分辨红外拉曼光谱显微联用系统, 可同步实现原位红外、拉曼和荧光光谱分析。其红外成像功能可对页岩样品进行亚微米级区域性官能团特征信号扫描, 精准识别轻质烃、重质烃及固体沥青等大分子有机质

的非均质性化学结构。页岩固体有机质通过范德华力、 π - π 堆积和氢键等多种非共价键作用力形成有机孔吸附保存小分子可动烃。而有机质类型、演化阶段和烃类组成等因素显著影响烃类吸附过程。通过热模拟实验制备梯度成熟度页岩样品, 结合干酪根提取残余烃类后进行原油吸附解吸实验, 可量化不同成熟度和多类干酪根对原油的吸附量和吸附种类, 并结合 O-PTIR 技术揭示烃类在页岩有机质中的赋存状态。

随着成熟度增加, 沉积有机质和可动烃的分子组成均会发生显著变化。基于 O-PTIR 的红外、拉曼和荧光同步原位分析, 可统计不同演化阶段显微组分的官能团组成差异, 计算成熟度相关性参数, 进而从分子化学层面评估显微组分的生烃潜力和生烃量。此外, 新型微区 X 射线荧光光谱分析仪通过高分辨率元素扫描(分辨率 $<10\ \mu\text{m}$)可对厘米级岩心中的矿物精细定性和定量评价, 实现全元素检测分析, 获取矿物的详细组成信息; 结合激光共聚焦显微分析系统与 O-PTIR 技术, 可展开多尺度储层的原位流体赋存状态研究。

关键词: O-PTIR; 非常规油气; 页岩; 煤岩气

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

全二维气相色谱-飞行时间质谱技术在非常规油气资源分析中的应用

李济远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

GC-MS 技术一直是石油化工领域对样品定性定量研究的重要手段, 而近年来 GCxGC-MS 技术凭借其超高分辨率在该领域大放异彩。本研究通过测试一些地区的非常规油气样品, 探究其地球化学参数, 深入研究该技术在非常规油气资源分析中的可行性。将样品分为: 饱和烃、芳烃、杂原子化合物三类, 又对藿烷、甾烷、萜烷等标志性生物标志化合物进行定量研究, 得以对样品进行成熟度分析, 还原其生烃演

化史, 并指导非常规油气开发。前人的研究已经证明在处理饱和烃和芳烃时, 使用的试剂应该是正己烷(分析纯)和二氯甲烷(分析纯), 双色谱柱温差在 35℃ 附近, 调制器温度为 208℃; 色谱图中可见各族组分呈不同区块分布, 代表不同极性化合物, 横向上为不同碳数的变化

关键词: 全二维; 非常规; 地化参数

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

铁基矿物-重金属作用微界面的原位表征与机制解析

欧阳磊

中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 武汉 430074

铁基矿物与重金属的界面行为显著影响其在环境中的迁移转化及归趋, 但传统表征手段难以实现固-液微界面反应的原位动态监测及分子机制解析。本研究采用原位表面增强拉曼光谱技术, 针对典型铁基矿物(如水铁矿、赤铁矿)与重金属(如 As、Sb)的界面作用过程, 实时追踪矿物表面晶相结构演变及重金属形态转化的协同机制。结果表明, 基于核壳隔绝的表面增强拉曼光谱可同步获取矿物羟基化表面重构、重金属吸附/氧化还原产物特征峰变化等关键信息, 揭示 Fe-O 键重组与重金属配位模式的动态耦合规律。相较于传统离线表征, 该方法

突破了非原位分析的时空分辨率局限, 可实现界面反应动力学与分子机制的关联解析。研究证实, 铁基矿物表面活性位点对重金属的络合能力及氧化还原效率受矿物晶面取向与局部微环境的调控, 为精准预测重金属环境行为及开发基于矿物界面调控的污染修复技术提供了理论依据。本工作凸显了原位表面增强拉曼光谱在多参数同步分析中的独特优势, 为复杂环境界面过程的原位解析与精准调控奠定了方法学基础。

关键词: 铁矿物; 重金属; 拉曼光谱; 原位表征

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

NH_4HF_2 消解-氨水共沉淀法准确测定地质样品中 Ag

何焘^{*}, 胡兆初

中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

银是一种强有力的地球化学示踪剂, 在各种地质过程中发挥重要作用(例如, 热液矿床的形成和地球及火星地幔的演化)。地质样品中含有大量的铅、铌和钇, 在 ICP-MS 分析过程中会造成严重的多原子干扰, 阻碍了这些样品中超微量银的测定。本文描述了一种简单快速的氨共沉淀方法, 经过 NH_4HF_2 消化后去除干扰元素(Zr、Nb 和 Y), 以通过同位素稀释 ICP-MS (ID-ICP-MS) 测定地质材料中的银。在掺杂实验中, 当向含有 1 ng/g Ag 和 10 $\mu\text{g/g}$ Zr、1 $\mu\text{g/g}$ Nb 或 1 $\mu\text{g/g}$ Y 的初始溶液中添加 4 ml 的 5% m/m 氨水时, Zr、Nb 和 Y 的去除率达到了 90%~100%。即使去除了 90% 的 Zr、Nb 和 Y, 来自上清液中残留干扰

元素的严重多原子干扰在银测量中仍然被观察到。通过在氨共沉淀之前向初始溶液中添加 10~10000 $\mu\text{g/g}$ 的基体元素(Si、Mg、Al、Fe 和 Ca), 消除了由残留 Zr、Nb 和 Y 引起的干扰。由于样品溶液中基体元素的质量分数较高(>10 $\mu\text{g/g}$), 因此对地质材料不需要额外添加基体元素。与内标法相比, 同位素稀释避免了在氨共沉淀过程中银的回收不完全造成数据结果的不准确。方法定量限为 1.38 ng/g。九种国际地质参考材料中银的测量结果与通过 ID-ICP-MS 和 ICP-MS/MS 获得的数据一致。

关键词: 银; 氨水共沉淀; 同位素稀释; 地质样品

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

明矾石 LA-MC-ICP-MS 测试方法研究及参考标样研制

高晓伟, 侯可军*

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100830

明矾石作为高硫化浅成低温热液矿床蚀变岩帽中常见的富硫矿物,其硫同位素组成通常为探索矿床的成因和成矿过程提供了宝贵信息。因此,明矾石硫同位素的测试分析至关重要。硫同位素微区分析具有快速、高空间分辨率、高精度等优点,本研究基于 LA-MC-ICP-MS 对影响实验准确性的基体效应、干扰扣除和仪器参数进行评估,建立了一种明矾石微区硫同位素分析方法。并研制一种用

于原位硫同位素分析的天然明矾石参考标样(MTS-1)。LA-MC-ICP-MS 测试结果表明,MTS-1 硫同位素组成均匀,IRMS 推荐值为 $3.42‰ \pm 0.31‰$,是 LA-MC-ICP-MS 硫同位素测量的合适参考物质。

关键词: 明矾石; LA-MC-ICP-MS; 标准参考物质; S 同位素

第一作者简介:高晓伟,研究生;研究方向:地质工程。

*通信作者简介:侯可军,研究员;研究方向:同位素地球化学、分析地球化学。

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于微孔压电超声雾化高效进样的元素、同位素灵敏 分析方法开发及地学与生命健康应用

朱振利

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074

元素及同位素地球化学研究地球演化、环境变迁以及生命健康的关键手段。相关领域的发展对超痕量元素、珍贵微量样品(如生物体液、纳米颗粒)的准确分析提出了更高的需求,但是传统气动雾化系统因样品引入效率低(通常<5%)严重制约了 ICP-MS 的灵敏度提升。基于此,本研究创新开发了一种基于微孔压电超声雾化(MUN)的高效样品引入系统。在优化条件下,该系统在 10~30 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的雾化速率范围内,能够实现 100% 的样品引入效率,分析灵敏度可提高一个数量级以上。此外,相较于常规气动雾化系统,MUN-ICP-QMS,显著降低了副产物比率,从而在无需依赖碰撞反应池(CRC)或其他干扰校正方法的情况下,准确测定了易受氧化物多原子干扰的元素,如地质样品中的稀土元素(REEs)。为验证该系统的有

效性和实用性,我们将其成功应用于血清、尿液、食蔬、地质样品和银纳米颗粒标准参考物质的元素定量分析及表征。进一步地,我们还将其与 MC-ICP-MS 联用,证实了其在微量样品同位素分析方面的潜力,单次分析仅需 2 ng Li,并成功获取了多种地质和生物材料标准参考物质的锂(Li)同位素组成,取得了可靠的测试结果。最后,我们还将该技术应用于精神疾病患者血清样品 Li 同位素分析,并初步证实了锂同位素在诊断精神疾病方面的潜力。综上所述,所研发的 MUN 高效样品引入系统为样本量有限的珍贵微量样品的 ICP-MS 分析测试可以提供可靠的技术支持。

关键词: 高效进样方法;高精度同位素分析;微量样品;同位素医学应用

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

单重静态法测量 MC-ICP-MS 离子计数器死时间

童喜润*, 卢山松, 邱啸飞

中国地质调查局武汉地质调查中心 (中南地质科技创新中心), 武汉 430205

用离子计数器 (IC: Ion Counter) 作检测器的多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 具有高灵敏度、低背景噪声的优点, 在地质、环境、核安全科学研究中有着广泛应用。然而, IC 的死时间效应会使其对离子的计数损失, 从而导致非线性信号响应问题。IC 死时间的精确测定是实现死时间效应校正的关键。多重静态 (Multi-Static) 测量法通过静态测量铀同位素比值, 克服了 MC-ICP-MS 信号波动问题, 测量精度较跳峰 (Peak Jumping) 测量法有显著提高。然而, 该方法需要使用具有放射性的 IRMM-073 或 IRMM-074 系列标准物质, 因而其应用受到了限制。本研究使用单重静态法 (Single-Static) 分别测量了武汉地质调查中心同位素实验室 Neptune plus 上两个 IC (SEM1 和 SEM2) 的死时间。实验使用一个 IC 和两个法拉第杯同时检测一系列有浓度梯度钨

金属溶液的 ^{180}W 、 ^{184}W 和 ^{186}W 信号, 然后通过钨同位素信号比值 ($^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$) 和 ^{180}W 信号强度 ($^{180}\text{W}(\text{IC})$ (cps)) 的线性关系计算出 IC 的死时间。在测量 SEM1 的死时间实验过程中, $^{186}\text{W}/^{184}\text{W}$ 保持稳定, ^{180}W 信号与 $^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$ 显示出良好的负相关关系 ($r^2=0.98$), SEM1 死时间的测定值为 19.2 ± 2.9 ns; 尽管 $^{186}\text{W}/^{184}\text{W}$ 在 SEM2 的死时间测量过程中保持了稳定, 但 ^{180}W 信号与 $^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$ 的线性关系不明显, 因而未能获得 SEM2 的死时间。一个可能的原因是 SEM2 没有配备高丰度阻滞器 (RPQ), 从而导致低丰度 ^{180}W 离子的测量受到高丰度 ^{182}W 离子的影响。

关键词: 死时间; 离子计数器; 单重静态法; MC-ICP-MS;

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

低铀方解石高空间分辨率 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年方法

张晨西

山东省地质科学研究院, 济南 250000

碳酸盐矿物特别是方解石分布广泛, 作为原生和次生矿物在多种地质环境中形成, 结合 U-Pb 同位素测年体系, 能为地球科学应用提供直接的时间约束, 具有广阔的应用前景。但方解石矿物的铀含量通常较低 (小于 $5\mu\text{g/g}$), 测年难度大, 限制了该方法的发展。激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 具有高灵敏度和高精度的特点, 已成功应用于锆石、方解石等副矿物的高空间分辨率 U-Pb 测年。本文针对 LA-MC-ICP-MS 的载气和氦气流速、屏蔽炬状态等实验参数进行了详细优化, 建立了适用于低铀方解石矿物的高空间分辨率 U-Pb 测年方法。为提升仪器灵敏度和等离子体状态, 详细讨论了锥组合、屏蔽炬接地状态、 N_2 引入量和 Ar 载气流速对 U、Pb 信号强度及氧化物产率 (UO/U) 的影响。结果表明, 在 Jet+X 锥组合、屏蔽炬接地、8 mL/min

N_2 引入量和 0.9 L/min 载气 Ar 流速条件下, Pb 灵敏度达到最高, 同时氧化物产率 (UO/U) 低于 1%。为验证该方法的准确性, 采用三个低铀 ($0.04\sim 0.63\mu\text{g/g}$)、方解石 U-Pb 定年参考物质进行测试, 使用高铀含量的 WC-1 标准物质作为校正 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 的外标, 同时减小束斑大小和剥蚀频率, 保持标准物质和待测样品的剥蚀坑纵横比一致。实验结果表明, 在 $44\mu\text{m}$ 束斑条件下, LD-5、PTKD-2 和 TARIM 的 U-Pb 年龄测试值分别为 $73.20\pm 0.56\text{ Ma}$ 、 $152.7\pm 2.5\text{ Ma}$ 和 $206.2\pm 1.3\text{ Ma}$, 与 ID-TIMS/ID-MC-ICP-MS 的定值结果在误差范围内一致, 验证了 LA-MC-ICP-MS 高空间分辨率测定低铀方解石 U-Pb 年龄的可靠性。

关键词: 低铀方解石; U-Pb 测年; LA-MC-ICP-MS; 高空间分辨率; 参数优化

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

碲高效光化学蒸气发生: 锑和铁离子的协同作用

黄渭文, 董亮, 邓秀琴, 余莹, 高英*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

碲 (Te) 因其独特的光电特性和热力学特性, 在工业应用、新材料开发以及荧光探针的生产中得到了广泛应用。然而, 由此带来的环境问题也引发了人们的高度关注。对碲在环境中的时空分布进行深入研究, 不仅有助于从科学角度揭示其迁移和转化规律, 还为评估人类活动对环境的潜在影响提供了重要依据。本研究建立了一种基于光化学蒸气发生 (photochemical vapor generation, PVG) 结合电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP MS) 的高灵敏痕量 Te 分析新方法。研究首次发现了锑 (Sb) 和铁 (Fe) 协同增敏 Te 的 PVG 过程。在优化条件下 [2% (v/v) 乙酸、5.0 mg/L Sb (III) 和 15.0 mg/L Fe (III)], 经 90 s 紫外线照射, Te (IV) /Te (VI) 的 PVG 效率高达 94%±3%。Te (IV) /Te (VI) 的检出限 (LOD) (3σ , $n=11$) 为 0.2 ng/L。本方法的分析灵敏度较传统气动雾化 (pneumatic nebulization, PN)

法提升了约 64 倍。通过对 1.0 $\mu\text{g/L}$ Te (IV) 和 Te (VI) 标准溶液进行 7 次重复测量, 获得相对标准偏差 (RSD) 分别为 2.1% 和 2.5%, 表明方法具有良好的精密度。将该方法应用于环境水样中痕量无机总碲的定量分析, 结果令人满意。本方法在保持高灵敏度的同时, 有机酸的使用量显著降低, 与以往关于 Te 的 PVG 体系相比, 酸用量减少了 10 倍以上。机理研究表明, 该体系中除生成挥发性 Te 外, 还生成了挥发性 Sb。同时, 检测到 Sb 和 Fe 的纳米粒子, 这些纳米粒子可能通过将自由基吸附至其表面, 为 Te 的还原提供高活性区域。本研究为在线分析环境样品中变价元素的总量提供了新的视角, 有助于理解在光化学过程中 Te、Sb 和 Fe 的相互作用。

关键词: 碲; 锑; 铁; 光化学蒸气发生; 电感耦合等离子体质谱

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41973019)

第一作者简介: 黄渭文 (1995-), 博士研究生; 研究方向: 地球化学。Email: 575889211@qq.com

*通信作者简介: 高英 (1981-), 教授; 研究方向: 地球化学。Email: ying.gaoy@gmail.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

一个新元古代锆石和一个渐新世斜锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素微区分析标准物质

牛俊龙*, 陈冉冉, 黄超, 王浩, 吴石头, 杨岳衡

中国科学院地质与地区物理研究所, 北京 100083

锆石 (ZrSiO_4) 和斜锆石 (ZrO_2) 是自然界中两种重要的含锆矿物, 作为副矿物锆石常见于各类岩石中, 斜锆石常见于硅不饱和火成岩中, 它们是最重要的 U-Pb 定年对象和 Hf-O 同位素示踪剂。微区分析 (LA-ICP-MS 和 SIMS) 需要基体匹配的标准物质进行仪器分馏校正。当前, 年龄在 610~1090 Ma 之间的锆石标准物质很少, 和良好表征的大体量斜锆石标准物质也非常有限。因此, 开发 610~1090 Ma 年龄区间的锆石标准物质和斜锆石标准物质, 是对这两种矿物标准物质库的有益补充。在本研究中, 我们评估了年龄为~816 Ma 的新元古代天然锆石 (WJS810) 和~32 Ma 的渐新世天然斜锆石 (SK10-3) 作为原位微区分析标准物质的适用性。对于 WJS810 锆石, ID-TIMS 分析得出的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为 $816.88 \pm 0.61 \text{ Ma}$ (2σ , $n=6$), SIMS 和两次 LA-ICP-MS 得出了 $821.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.2, $n=110$)、 $815.6 \pm 3.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.3, $n=64$) 和 $815.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.3, $n=59$) 的结果,

与 ID-TIMS 年龄在分析不确定范围内一致。LA-MC-ICP-MS 测定 WJS810 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值平均为 0.282548 ± 0.000043 (2σ , $n=121$), 与溶液 MC-ICP-MS 测定的平均值 0.282548 ± 0.000005 (2σ , $n=6$) 一致。SIMS 测定 WJS810 锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $6.65\text{‰} \pm 0.36\text{‰}$ (2σ , $n=117$), 与激光氟化法的测定结果 $6.46\text{‰} \pm 0.21\text{‰}$ (2σ , $n=8$) 一致。SK10-3 斜锆石经 ID-TIMS 分析得到的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $31.592 \pm 0.020/0.022/0.040 \text{ Ma}$ ($n=7$, 2σ , MSWD = 2.2)。MC-ICP-MS 分析 SK10-3 斜锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值平均为 0.282742 ± 8 (2σ)。与大多数斜锆石相比, SK10-3 具有较高的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (~0.007), 这使得在 LA-MC-ICP-MS 的 Hf 同位素测量过程中能够精确测量 βYb , 并有助于 $\beta\text{Yb}-\beta\text{Hf}$ 关系的计算。

关键词: 新元古代锆石; 渐新世斜锆石; 标准物质; ID-TIMS; LA-ICP-MS

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

稳定镁同位素组成的双稀释剂法分析

何永胜*, 汪洋, 张寅楚, 柯珊

中国地质大学(北京), 北京 100083

镁(Mg)在自然界仅有 3 个稳定同位素, 传统上被认为不能使用双稀释剂法进行同位素分析。因为, 双稀释剂法同位素分析需要通过三个同位素比值的混合方程求解未知数, 理论上仅适用于拥有四个及以上同位素的体系。以往的 Mg 同位素分析中仪器分馏都是基于标样-样品间插法(SSB)校正, $\delta^{26}\text{Mg}$ 的长期分析精度一般 $\geq 0.05\text{‰}$, 准确度依赖于严格的样品、标样匹配(包括酸度、浓度和基体等)。最新理论研究表明对于 3 同位素体系存在特定的双稀释剂组成和稀释比, 使得数据校正对仪器分馏不敏感, 使双稀释剂法应用于 3 同位素体系成为可能。这种技术因此也被称为临界混合双稀释剂法(Critical Mixture Double Spike method, CMDS), 可将 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的分析精度提高至 $0.02\text{‰}\sim 0.03\text{‰}$ 。本实验室对相同地质标样的 CMDS 和 SSB 方法结果对比揭示: (1) 对于 Mg 单元素标准溶液以及大西洋标准

海水, 两种方法虽然分析精度存在差异, 但分析结果的均值相同; (2) 对于其他复杂基体的岩石、沉积物和矿物标样, SSB 方法获得的结果相对 CMDS 系统偏轻, 且偏轻的程度与标样的 MgO 含量以及基体复杂度相关, 标样的 $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al}+\text{Ca})$ 越高、纯化后残余基质元素越多, 两者的偏差越大^[3]。这种偏差可归因于 SSB 方法在校正仪器分馏时存在基质效应, 因为即使经过严格的化学纯化流程, 对于复杂基体的样品, 纯化后的 Mg 溶液仍然不可避免存在残余基质元素, 而难以与间插的纯 Mg 标准溶液达到完全的基体匹配。因此, CMDS 方法不仅能显著提高 Mg 同位素分析的精度, 还使得具有复杂基体样品分析的准确度显著提升。

关键词: 镁同位素; 三同位素体系; 双稀释剂方法; 基体效应; 高精度分析

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

FTICR MS 在解析生物碳酸盐埋藏有机碳组成中的应用

刘海龙

南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023

揭示微生物驱动形成的球霏石的稳定性机制有助于进一步理解生物源矿物的形成机制及其潜在环境意义。解决这个问题, 关键要明确碳酸盐矿物埋藏有机碳组成与结构特征。鉴于金属离子-碳酸根固有的性质如电子结构, 酸碱性等化学特性, 其固定有机质在种类, 性质上有一定共性和代表性。傅里叶变换离子回旋共振质谱拥有高分辨率, 高灵敏度及高通量的分子检测能力, 为埋藏有机质的精确组成及性质的研究提供了关键技术。前期, 我们利用贝莱斯芽孢杆菌诱导了生物碳酸盐球霏石形成; 继而结合 TGA、XRD 以及 SEM-EDS 等技术分析其中的有机质相对含量; 建立了 H_2O_2 -HCl 联合提取生物碳酸盐埋藏有机质的前处理方法, 通过 FTICR MS 技术, 解析了其精细结构组成。最后, 通过典型有机质的体外生物矿化验证性实验、分子动力学模拟和 DFT 计算, 从实验和理论两个层面验证了有机质和碳酸盐晶体的相互作用促进生物球霏石稳定性提升的机制。研究结果

显示, 细菌诱导合成的球霏石含有丰富的有机质(相对含量约为 21%), 植入球霏石晶体结构中主要的有机质分子类别为 C20-28O9-14, 且多含有羧基, 氨基以及羟基等功能基团, 有机质通过以上官能团和钙离子或碳酸盐离子形成了致密的有机-无机杂化作用力进而提升了球霏石的稳定性。与单一无机 CaCO_3 晶体相比, 生物球霏石中所封存的有机质与无机 CaCO_3 作用生成的杂化键合作用力能大大提高球霏石结构的稳定性。具有高度稳定性的生物碳酸盐不仅能够使其自身稳定存在, 还对 CO_2 的长期固定非常有利。事实上, 有机质和碳酸盐的这种相互作用并不只在球霏石中存在, 也在其他矿物中广泛存在。比如黏土矿物, 铁矿以及其他碳酸盐矿物, 这也说明生物矿物的形成对有机质的封存是碳汇研究不可忽视的重要方式。

关键词: FTICR MS; 有机质组成; 球霏石; 碳汇

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

独居石微区原位 U-Th-Pb 定年标准物质研制

崔玉荣^{1,2,3*}, 喻光明¹, 涂家润², 周红英², 谢烈文³, 李秋立³

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

独居石作为理想的 U-Th-Pb 定年对象, 可解决稀有金属矿床成矿时代、中-低级变质作用时代、沉积地层的演化时代等难题。基体效应是 LA-(MC)-ICPMS 和 SIMS 等微区分析的一个主要问题, 用基体匹配的标准物质进行元素分馏校正是克服基体效应、获得准确分析结果的关键。然而, 当前国内外缺少高质量的微区分析标准物质, 严重制约了独居石 U-Th-Pb 年龄的发展与应用。本文利用扫描电镜和电子背散射图像、微区 X 射线荧光面扫描、电子探针、激光拉曼、LA-(MC)-ICP-MS、SIMS 以及高精度 ID-TIMS 等分析技术, 通过大量的野外调研及十几年的工作积累, 初步确定了 2 件备选样品。其中 1 件独居石样品 16TW01, 利用 LA-MC-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素测年, 获得的初步结果为 479 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=0.21); 然后利用 LA-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素年龄测定, 获得的结果为 480 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=0.14), 年龄较为均一。其 U 含量为 ~ 4000 $\mu\text{g/g}$, Pb 含量为 ~ 1000 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 5%~7%。另

1 件独居石样品 15FX01, 利用 LA-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素测年, 获得的结果为 229 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=1.09); 利用单颗粒 ID-TIMS 法进行 U-Pb 定年, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 228.9 ± 0.6 Ma ($n=4$, MSWD=1.6)。其 U 含量为 ~ 1500 $\mu\text{g/g}$, Pb 含量为 ~ 300 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 $\sim 2\%$ 。后续将严格按照标准物质研制规范, 对备选样品进行 ID-TIMS U-Pb 与 Th-Pb 以及 LA-(MC)-ICP-MS、SIMS U-Th-Pb 同位素测年比对实验等工作。本研究能够有效解决目前独居石标样缺乏及依赖国外实验室的现状, 满足日益增长的微区实验室测试需求。同时对于合理地利用独居石标准物质进行微区原位 U-Th-Pb 定年, 进而获得准确可靠的成岩成矿作用的地质年代学信息, 具有十分重要的应用价值和科学意义。

关键词: 独居石; U-Th-Pb 定年; 微区原位; 标准物质

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

同位素稀释—电感耦合等离子体串联质谱法 (ID-ICP-MS/MS) 准确测定地质样品中的 S-Se-Te

李嘉威, 宗克清*, 汪在聪

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

硫(S)、硒(Se)和碲(Te)作为同属于第六主族的亲铁和强亲铜挥发性元素, 能够为核幔分异、壳幔岩浆演化以及挥发性物质运移等关键地质和宇宙化学过程提供重要信息。然而, 受元素的丰度、挥发性以及严重质谱干扰的影响, 地质样品中 S-Se-Te 的准确测定面临技术挑战。目前主流方法采用同位素稀释法(ID)结合化学纯化流程与氢化物发生装置, 在高分辨电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)中进行分析。虽然可以通过同位素交换平衡补偿元素的挥发损失, 但该方法仍存在前处理流程繁琐、试剂消耗量大以及需要额外装置等局限。电感耦合等离子体串联质谱(ICP-MS/MS)创造性地具备在线分辨分析物和干扰离子的能力, 因此成为解决 ICP-MS 测试中质谱干扰问题最有效的手段之一, 但其在地质样品元素分析方面的应用仍有待拓展。本研究将同位素稀释法在溶样方面的优势与 ICP-MS/MS 在线消除质谱干扰的

分析优势有效结合, 建立了准确、高效测定地质样品中 S-Se-Te 的分析方法。经过对碰撞反应池参数(反应气流量、八级杆偏转电压)和积分时间的系统研究和优化实验, 确立了基于 N₂O 或 O₂ 作为反应气的最佳无干扰分析策略。八种不同岩性(从超基性岩到酸性岩)的国际地质标样经硝酸-氢氟酸/逆王水两步消解, 在稀释 1000 倍后直接上机测试。ID-ICP-MS/MS 在两种反应气模式下的 S-Se-Te 含量测试结果都与经过化学纯化处理的常规 ID-ICP-MS 数据高度一致(相对偏差基本小于 10%)。该方法大大缩短了样品前处理时间, 降低了人力物力的消耗, 提高了样品测试效率。同时也为地质样品中低含量、高干扰元素的准确测定提供了新思路。

关键词: S-Se-Te; ICP-MS/MS; 同位素稀释法; 质谱干扰抑制; 元素含量分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(42373023)

第一作者简介: 李嘉威(1997-), 博士研究生; 研究方向: 地球化学分析方法。Email: ljw@cug.edu.cn

*通信作者简介: 宗克清(1982-), 教授; 研究方向: 深部挥发份循环, 地球化学分析方法, 壳幔相互作用。Email: zongkeqing@cug.edu.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于红外拉曼光谱显微系统的页岩有机质类型与成熟度表征

徐镭

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

页岩有机质的类型与成熟度是评价页岩油气资源潜力的关键参数, 但其精细表征仍面临技术挑战。本研究通过红外拉曼光谱显微系统对四川盆地页岩样品进行非破坏性分析, 通过对比页岩样品的有机质光谱特征, 系统分析了红外光谱中脂肪族、芳香族及含氧官能团的强度变化规律, 结合拉曼光谱 D 峰、G 峰峰位及 D/G 比, 得以精细表征页岩样品中有机质类型与成熟度。前人研究表明, 拉曼光谱 D 峰与 G 峰的强度比反映了有机质的芳香结构有序度, 较高 D/G 比通常表示有机质结构的无序程度较高, 反之则表示有机质结构的有序程度较高。新兴的光学光热红

外光谱 (O-PTIR) 技术可突破光学衍射极限, 提供远高于传统红外光谱的空间分辨率, 基于 (O-PTIR) 技术的红外拉曼光谱显微系统可对样品进行非破坏性原位分析且具备强大的数据收集统计能力。红外拉曼光谱显微系统可作为优化传统有机质类型与成熟度表征方法的有效手段帮助研究人员更为精细地评价页岩油气资源潜力, 对页岩油气资源评价及勘探开发具有重大意义。

关键词: 页岩有机质; 成熟度; 红外光谱; 拉曼光谱

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

超低铱含量在少量地质样品中的测定：同位素稀释联用多离子计数电感耦合等离子体质谱法

徐诚, 李伟强*, 安诗超*

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

本研究开发了一种基于同位素稀释联用多离子计数 MC-ICP-MS 的超低铱含量分析技术, 解决了地壳样品 (pg/g 级) 精准测定的挑战。通过 ^{191}Ir 稀释剂与样品混合, 结合 AG MP-1 阴离子交换树脂分离有效去除 Lu、Hf 等干扰元素, 利用 Nu 1700 Sapphire MC-ICP-MS 的双不连续打拿极计数器同步检测 $^{191}\text{Ir}/^{193}\text{Ir}$ 比值, 显著提升了灵敏度 (检出限 0.35 pg/g) 与抗干扰能力。研究表明, 碰撞池技术虽未有效消除 HfO^+ 等重离子干扰, 但化学纯化结合常规质谱分析已足够满足超低丰度

Ir 测定需求。通过验证 K-Pg 界线标准 (DINO-1) 与 6 种 USGS 地质标样, 方法结果与文献值高度一致, 且对 11 种低 Ir 地质标样 (涵盖基性岩至沉积岩) 的分析表明其适用于铂族元素分异、岩浆演化过程及撞击事件研究中 Ir 含量的精确解析, 为铂族元素地球化学循环提供了高灵敏、低空白的技术支撑。

关键词: 铱元素; 超低含量; 多离子计数; 同位素稀释法; MC-ICP-MS

基金项目: 国家自然科学基金 (42425301); 中央高校基本科研业务费专项资金 (020614380203)

第一作者简介: 徐诚 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 同位素地球化学, 矿床学。Email: 1944657193@qq.com

*通信作者简介:

李伟强 (1983-), 教授; 研究方向: 同位素地球化学, 矿床学。Email: liweiqiang@nju.edu.cn

安诗超 (1985-), 工程师。Email: asch@nju.edu.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年方法测定大别造山带 基性岩多期变质年龄

张利国^{1*}, 金巍^{1,2}, 邓新^{1,2}

1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205;

2. 中国地质调查局 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205

硅不饱和变基性-超基性岩浆岩形成及其变质年龄的精确测定是同位素地质年代学研究的难点。由于岩浆结晶分异产生的 Sm/Nd 和 Rb/Sr 比值差异很小, 传统的全岩稀释法 Sm-Nd、Rb-Sr 等时线方法往往无法获得理想的等时线年龄。与之相比, 分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年方法通过不同酸试剂对单个岩石样品进行分步溶解, 再对各溶解相分别进行 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素组成分析以获得等时线年龄。该方法不仅样品用量少、测试周期短、成本低, 而且能有效避免单一地质体中不同空间样品形成时代的不确定性, 因而在对一些硅不饱和样品(如橄榄岩、玄武岩、碳酸岩)的年代学研究中取得了良好效果。本研究对大别造山带蕲春地区一套古元古代变基性岩脉进行了分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年。在对单个粉末样品进行醋酸清洗处理后, 依次采用盐

酸、王水和氢氟酸-硝酸对基性岩样品进行分步溶解, 然后分别对盐酸溶解相、王水溶解相、王水不溶相和全岩开展了 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素组成分析。结果显示, 变基性岩样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.0483~0.1475, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.511475~0.511999, 获得 Sm-Nd 等时线年龄 $t=805\pm14\text{ Ma}$ (MSWD=0.31); $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.4036~3.809, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.71395~0.71969, 对应 Rb-Sr 等时线年龄 $t=112.0\pm3.2\text{ Ma}$ (MSWD=1.7)。结合区域上已广泛出露的新元古代和早白垩世岩浆事件, 认为本文获得的两条等时线年龄可能分别记录了这两次构造-岩浆事件对大别造山带内古元古代基性岩的叠加改造过程。

关键词: 分步溶解; Rb-Sr 等时线; Sm-Nd 等时线; 大别造山带; 变基性岩

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

VisualbetaAge: 一个基于 Iolite 软件的激光微区 β 体系 定年数据处理方法

吴石头

中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

电感耦合等离子体串联质谱 (ICP-MS/MS) 技术的突破, 实现了同质异位素的在线分离, 如能够区分 ^{176}Hf 与 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 的相互干扰。该技术与激光剥蚀 (LA) 系统联用, 可进行微区 β 衰变体系定年。近年来, 这一技术发展迅速, 已成功应用于多种矿物的 Rb-Sr、Lu-Hf、K-Ca 和 Re-Os 等定年体系, 极大地拓展了微区地质年代学的领域, 特别是突破了传统 U-Pb 体系的局限。然而相比于硬件技术的快速发展, 数据处理软件开发相对滞后。本文报道了一款基于 Iolite 平台的数据处理工具: "VisualbetaAge", 专用于激光微区 β 衰变体系数据处理。该工具集成了 Iolite (一款通用质谱数据分析软件) 中的数据处理代码方案 (DRS) 以及可视化模块, 其具有以下突出优点: (1) 可进行井下分馏校正, 该工具能够监测母体与子体比值的井下分馏情况 (DHF) 并进行校正。以 Rb-Sr 体系为例, 虽然该方法显著提高了内部测量精度, 但由于不同基体间的 DHF 模式存在差异, 其准确度没有得到本质提升; (2) VisualbetaAge 支持单个或多

个同位素体系的同步数据处理。例如, 可同时处理白云母 ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) 中的 Rb-Sr 和 K-Ca 年龄, 以及硅铍钇矿 ($\text{Y}_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$) 中的 Lu-Hf 和 Pb-Pb 年龄, 显著提高了数据处理效率; (3) 创新性地实现了实时等时线可视化功能。可根据需要, 以自定义积分区间显示单个或多个实时 (反向) 等时线图。支持固定或不固定初始值的实时年龄计算, 为数据准确性和精度的实时评估提供了便利, 同时也有助于识别异常数据点。此外, 该工具还具备同质异位素干扰校正, 特别是针对 Re-Os 体系, 少量的 Re 反应会干扰到 Os 同位素准确测定。通过采用基质匹配的参考物质, 还可实现在线基质效应校正。VisualbetaAge 为 β 衰变体系的分析提供了一个功能强大、应用灵活的研究工具, 将有助于该领域的发展。

关键词: 串联质谱仪; 激光微区 β 体系定年; 数据处理; Iolite 软件

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

富碳质样品 Re-Os 同位素研究进展

李超

国家地质实验测试中心, 北京 100037

在富碳质样品（如黑色页岩、煤、烃源岩）的 Re-Os 同位素定年研究中，样品前处理是确保分析可靠性的关键环节。目前广泛采用的氧化性消解体系（如 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-CrO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CrO}_4$ 等）虽能有效分解有机质并释放目标元素 Re 和 Os，但仍面临三方面主要挑战：其一，试剂本底干扰，传统消解体系中硝酸、盐酸及氧化剂（如 H_2O_2 、 CrO_3 ）常含有痕量 Re 和 Os 杂质，尤其在低含量样品（ppb

级以下）分析中易引入显著背景误差；其二，环境与安全风险，含六价铬（ Cr^{6+} ）试剂（如 CrO_3 、 Na_2CrO_4 ）具有强毒性和致癌性，其使用需严格防护且废液处理成本高昂；其三，流程复杂性与效率瓶颈，为降低本底并分离 Os，需结合多步纯化技术（如蒸馏、阴离子交换），导致实验周期延长且可能造成目标元素损失。

关键词：Re-Os 定年

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

如何得到一个好的原位 Rb-Sr 等时线年龄: 以金矿床为例

于鹏岳, 李超*

国家地质实验测试中心, 北京 100037

铷 (Rb) - 锶 (Sr) 定年是地质年代学中的重要手段, 但传统同位素测试方法受质谱分析中 ^{87}Rb 同位素干扰影响。近年来, 激光剥蚀电感耦合等离子体串联质谱 (LA-ICP-MS/MS) 的发展实现了原位 Rb-Sr 定年。该技术通过向碰撞反应池中引入氧化性气体 (如 N_2O 或 SF_6), 使 Sr^+ 与气体反应转化为 SrO^+ , 从而实现 ^{87}Rb 与 ^{87}Sr 的在线分离。原位 Rb-Sr 定年具有高效、低成本和高空间分辨率等优势, 被广泛应用于地质研究。铷锶比值及年龄的准确度和精密度主要取决于激光、质谱参数设置和样品选择。为获取高精度铷锶同位素数据, 本研究系统考察了驻留时间、激光剥蚀频率、能量密度、光斑尺寸、剥蚀时间和样品选择的影响。研究表明, 50 ms 驻留时间适用于多数样品, 可在保证数据量的同时提升灵敏度; 较大光斑尺寸 ($>50\ \mu\text{m}$) 能显著提高测量精度并减少元素分

馏; 不同能量密度水平会显著改变 Rb 与 Sr 的元素分馏行为; 3 Hz 或 5 Hz 重复频率适用于多数样品, 而 10 Hz 虽可降低单点误差, 但会导致 Rb/Sr 比值显著偏移, 故不建议使用。剥蚀过程中存在明显的深度分馏效应 (down-hole fractionation), 标准样品与待测样品的信号必须取自相同时间区间以保证数据可靠性。将上述得到的条件应用于赋存在泥盆系李坝群变质沉积岩中的李坝金矿床作为研究对象。该矿床属成矿物质来源复杂的造山型金矿床。通过矿物学和地球化学方法对矿床中出现的各类绢云母进行分类研究, 筛选出最合金矿定年的绢云母类型, 从而通过精细矿物筛选提高 Rb-Sr 年代学对造山型金矿定年精度。

关键词: 原位 Rb-Sr 定年; LA-ICP-MS/MS; 造山型金矿

第一作者简介: 于鹏岳 (1999-), 男, 硕士研究生, 地质学专业。Email: ypy_13@qq.com

*通信作者简介: 李超 (1983-), 男, 研究员, 博士生导师; 研究方向: 地球化学研究。Email: Re-Os@163.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

准噶尔盆地中央坳陷西南部二叠系深层高-过成熟烃源岩生烃潜力评价

王晨宇, 常象春*

山东科技大学, 青岛 266590

利用岩石热解、碳硫分析、生物标志物分析、干酪根显微组分、金刚烷定量、分子地球化学技术、主微量元素分析以及有机质恢复等手段, 从有机质热演化程度、有机质类型及有机质丰度三方面对准噶尔盆地中央坳陷西南部二叠系深层高-过成熟烃源岩的生烃潜力进行了系统研究, 并总结了一套评价高-过成熟烃源岩的研究方法。通过对已钻揭的沙湾凹陷征深 101 井及盆 1 井西凹陷庄深 1 井的烃源岩进行综合评价, 研究结果表明: 在传统镜质体反射率判断热演化程度的基础上, 综合利用金刚烷类化合物、甲基菲指数以及激光拉曼光谱, 目前研究区烃源岩的热演化程度均已达到高-过成熟阶段。平面上, 在 P_{1f} 层位与 P_{2w} 层位上, 沙湾凹陷征深 101 井的热成熟度高于盆 1 井西凹陷庄深 1 井; 垂向上, 两口井均表现出 P_{1f} 层位比 P_{2w} 层位的热成熟度更高。拉曼光谱和红外光谱综合判定研究区样品有机质类型主要为 II 型。通过物质平衡法、降解率法以及无机元素法三种有机质恢复技术手段, 获得原始的有机碳含量及生烃潜量。结

果表明恢复后, 沙湾凹陷征深 101 井 P_{1f} 层位的样品恢复后有机质丰度为中等—优质, 以优质为主; P_{2w} 层位的样品为优质烃源岩。盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2x} 层位的样品为差—优质, 以好—优质为主; P_{2w} 层位的样品为差—优质, 以好—优质为主。从水平上来看, 沙湾凹陷征深 101 井 P_{2w} 层位的样品相比于盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2w} 层位的样品表现出更高的有机质丰度。值得注意的是, 盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2x} 烃源岩显示出比 P_{2w} 烃源岩更优的潜力, 是一套值得关注的烃源岩。综合分析表明, 沙湾凹陷征深 101 井可能处于较深水、稳定的还原环境, 沉积速率可能更适中, 水体分层更稳定, 营养物质供应更充足, 有利于有机质富集。本研究的系统评估推动了高超成熟烃源岩的评估方法, 并强调了准噶尔盆地高超成熟二叠系烃源岩的勘探潜力。

关键词: 高-过成熟烃源岩; 烃源岩生烃潜力评价; 激光拉曼光谱; 傅里叶红外光谱; 有机质恢复

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372160, 42072172); 山东省自然科学基金项目 (ZR2021QD072, ZR2020QD040)

第一作者简介: 王晨宇 (2000—), 博士研究生; 研究方向: 油气地球化学。Email: 824127348@qq.com

*通信作者简介: 常象春 (1974—), 教授; 研究方向: 油气地球化学。Email: xcchang@sdu.edu.cn