

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 富硫酸盐体系单个流体包裹体成分 LA-ICP-MS 分析及应用

蓝廷广

中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

富硫酸盐流体广泛存在于各种地质流体中, 特别是碳酸岩-碱性岩相关稀土矿中, 而此类稀土矿提供了全世界主要的稀土资源。富硫酸盐流体元素组成的高精度测定可为精准示踪成矿流体来源、精细刻画成矿过程提供重要支撑, 但目前尚无富硫酸盐流体包裹体元素含量高精度微区原位分析方法的建立。针对上述问题, 本研究利用激光拉曼光谱仪和激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 结合的方法, 建立了富硫酸盐流体包裹体主、微量元素 (尤其是稀土元素) 微区原位分析方法。首先利用激光拉曼光谱定量分析富硫酸盐流体包裹体中的硫酸根含量, 分析

误差在 $\pm 5\%$ 以内, 将硫酸根含量转换为 S 含量, 并以此为内标, 结合 LA-ICP-MS 分析, 获得流体包裹体中的主、微量元素含量。多元素流体包裹体标样分析显示, 绝大多数元素的分析误差在 $\pm 15\%$ 以内。利用上述方法, 开展了代表性稀土矿 (微山稀土矿) 应用研究, 发现富硫酸盐子晶流体包裹体含有高达数千 ppm 的稀土元素, 显示高浓度硫酸盐热液对稀土元素的迁移具有重要作用。

**关键词:** 硫酸盐; 单个流体包裹体; 元素含量; LA-ICP-MS; 稀土矿

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 深层-超深层白云岩实验技术与储层成因机理的新进展

李茜

中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

深层-超深层白云岩储层中蕴含着丰富的油气资源, 是未来油气勘探开发的重点领域。但是有关深层-超深层白云岩的储层成因机理仍存在诸多疑问, 很大程度上限制了地下含油气白云岩储层分布范围的有效预测。随着白云岩新型实验技术的快速发展, 近年来在解释深层-超深层白云岩成因机理和储集空间保持机制方面取得了诸多进展。新型实验技术方面: 微区取样技术提高了地球化学信息的可靠性, 高精度 Mg-Ca 同位素为约束白云石化流体来源提供了有效指标, 激光 U-Pb 同位素结合团簇同位素成为确定深层-超深层白云岩基质或孔隙填充物绝对年龄、形成温度和油气成藏的重要手段, 储层模拟实验为理解深层-超深层白云岩孔隙演化过程提供了正演模

型, 多尺度储层定量表征技术为解析深层-超深层白云岩储集空间的三维结构和油气流动性带来了直观依据。深层-超深层白云岩储层成因机理方面: 明确了深层-超深层白云岩储层孔隙受原始沉积环境和后期成岩改造的综合控制, 探究深层-超深层白云岩储层孔隙成因机理需要综合分析沉积背景和各種成岩作用对白云岩储层孔隙增加、减少和保持的相互耦合机制, 建立深层-超深层白云岩储集空间的形成-改造-保存的动态演化过程, 进而得出优质白云岩储层的主控因素和分布范围, 最终为油气勘探指明正确的方向。

**关键词:** 深层-超深层; 白云岩; 新型实验技术; 成因机理; 油气勘探

· 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 ·

## 罗布泊第四纪深层含钾卤水成因机制探讨

樊馥

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

**摘要** 【目的】论文通过对罗布泊地区 LDK02 孔 200~500 m 卤水进行水化学分析, 探讨罗布泊深部卤水地球化学及成因演化特征, 对卤水钾盐成矿模式进行探索, 为后续罗布泊深层含钾卤水资源选区提供科学依据。【方法】通过对罗布泊地区 LDK02 孔卤水储层岩石学分析, 卤水常、微量元素及同位素检测, 利用相图、元素相关性分析等手段, 【结果】研究发现 LDK02 孔 200~500 m 早-中更新世卤水硫酸盐型为主,  $K^+$  含量远超 3 g/L 的卤水  $K$  单独开采利用标准。卤水  $Na/Cl$  系数接近 1 以及与海相沉积物接近的硼同位素特点, 反映了卤水主要为海相盐类溶滤成因类型,  $B$  和  $K$  的正相关性, 反映溶滤盐层提供了卤水中一定量的  $K$ 。D、O 同位素正漂移、与中新世含盐地层相近的锶同位素特点, 进一步指示了卤水主要为中新世含盐地层淋滤且经

历了浓缩蒸发过程形成。结合前人对于罗布泊早-中更新世构造演化及现代径流系统形成历史的研究, 说明塔里木河携带的古近纪-新近纪海相和海陆交互相含盐地层, 主要是中新世含盐地层溶滤盐类物质补给是该层段卤水  $K^+$  的重要来源。此外, 卤水  $K$ 、 $B$ 、 $Li$  良好的正相关性、结合更新世时期西域构造运动背景, 认为西域运动相关的深部富  $K$ 、 $Li$  热液、以及与构造运动相关的储层火山碎屑物质的溶蚀溶解, 也为卤水中提供了  $K$  的重要物质来源。【结论】以此为基础, 初步建立了罗布泊早-中更新世 200~500 m 深层含钾卤水“深部物质补给+古盐溶滤”二元成钾模式。

**关键词:** 罗布泊; 第四纪; 常、微量元素; 同位素; 成钾物质来源

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 羌塘盆地白云岩成岩作用与油气成藏的时空耦合过程： 流体包裹体地球化学和碳酸盐岩原位 U-Pb 定年的制约

卢宽，贾凡琛，朱延庆，黄月，陈思钰，蓝婉嫣

长江大学 地球科学学院，武汉 430100

羌塘盆地与中东油气富集区同属特提斯构造域，是我国面积最大的中生界海相沉积盆地，勘探前景被寄予厚望。尽管盆地内侏罗系白云岩地层发现多处油气显示，但仍未有大的勘探突破，成藏时期不明确是重要的制约因素之一。为重建羌塘盆地油气演化历程和评价油气储存条件，综合运用岩石学、包裹体地球化学和 U-Pb 定年等方法，探讨白云岩储层形成过程和油气充注之间的联系。研究发现，白云岩储层偏向下侏罗系形成（约 190 Ma），而后发生重结晶，溶蚀作用，并发育多期孔洞，缝方解石，白云石中有少量石油包裹体显示，孔、缝

方解石中无荧光显示，但存在大量甲烷气包裹体，通过拉曼定量分析恢复的古压力小于 1，指示储层为弱压环境，结合强构造环境推测发生油气逸散。基于 U-Pb 定年的白云岩成岩序列和油气包裹体证据在流体尺度揭示了羌塘盆地石油聚集主要发生在白云石化事件结束后的早期，白垩纪以来的地质运动可能以破坏成藏为主，白云岩储层形成初期的孔喉系统通常决定了其油藏规模。

**关键词：**羌塘盆地；侏罗系白云岩；油气成藏；流体包裹体

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 万米深层石油地质学理论进展与挑战

朱光有, 朱延庆, 黄月, 蓝婉嫣

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

随着全球中浅层油气资源逐渐枯竭, 超深层及万米深层 (>8000 m) 油气勘探已成为石油工业发展的必然趋势。中国近年来在塔里木盆地和四川盆地等克拉通盆地实施的超深井钻探取得了一系列重大突破, 揭示了万米深层油气资源的巨大潜力, 推动了石油地质学理论体系的革新。本研究总结了超深层油气地质研究的核心进展, 探讨了关键科学问题及未来挑战, 为全球超深层油气勘探提供理论支撑与实践参考。传统观点认为碳酸盐岩储层埋深超 6000 m 后原生孔隙几乎消失, 但中国克拉通盆地研究证实超深层碳酸盐岩储集空间以次生溶蚀孔、洞、缝为主, 其保存机制突破深度限制。岩石力学模拟表明静岩压力作用下, 溶洞围岩可通过压力拱效应实现力学稳定, 即使 7500 m 深度仍可保持空间完整性。塔里木盆地奥陶系缝洞型储层 8000 m 深度仍发育大型溶洞, 钻井放空、漏失现象普遍, 证实储层非均质性极强且无深度下限。白云岩储层因准同生云化作用及早期油气充注抑制成岩作用, 孔隙保存能力显著优于灰岩。研究揭示低地温场盆地液态石油保存深度下限可达 9000 m, 突破传统“黄金带理论”局限。晚海西期形成古油藏因低地温梯度及短期高温暴露, 避免大规模热裂解, 至今保持单一油相。四川盆地安岳气田震旦系气

藏通过区域性膏盐盖层及构造稳定性实现超长寿命保存。金刚烷及乙基降金刚烷化合物作为原油裂解标志物, 建立相态判识图版, 为超深层油气相态预测提供新手段。超深层油气渗流机制与中浅层不同, 提出“渗流 - 管流耦合”理论。裂缝 - 溶洞系统形成复杂输导网络, 油气分布受控于储层非均质性及断裂带。塔里木盆地发现断控型油气藏, 油气沿走滑断裂垂向运聚, 形成高效富集区。四川盆地发育大面积滩体气藏, 展现规模潜力。中国超深层油气勘探成果显著: 塔里木盆地台盆区探明油气当量超 30 亿吨, 顺北地区 48 口超 8000 m 深井中 20 口获千吨产能; 四川盆地安岳气田储量超 2 万亿方。克拉通盆地深层烃源岩生烃强度大, 形成近源 - 断控复式成藏系统, 万米深层南华系—寒武系烃源岩及储盖组合具备万亿吨级资源潜力。克拉通盆地超深层油气地质理论通过储层保存机制、成藏动力学及勘探模式创新, 突破传统石油地质学认知边界, 指导中国 10 亿吨级油田与万亿方气田发现。未来需深化多盆地对比研究, 发展适应极端环境勘探技术, 构建全球万米深层油气资源评价体系, 为石油工业迈向“超深时代”提供科学引擎。

**关键词:** 超深层; 克拉通盆地; 油气成藏

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 页岩中方解石形态类型、成因及其储层特性与勘探启示

陈泓州<sup>1</sup>, 朱光有<sup>1\*</sup>, 卢志远<sup>1</sup>, 李茜<sup>2</sup>, 张杰志<sup>1</sup>, 刘健勇<sup>1</sup>,  
郑凯航<sup>1</sup>, 王嘉宁<sup>1</sup>

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

页岩作为重要的烃源岩与储层, 其矿物组成对储层特性具有关键控制作用。方解石作为页岩中常见矿物之一, 其形态特征、成因机制及地质意义对页岩油气勘探开发至关重要。页岩中方解石主要形态类型包括亮晶方解石、泥晶方解石、重结晶方解石及方解石胶结物等。研究表明, 方解石脉的形成受流体超压、构造应力与结晶力共同驱动, 可分为三期: 早期受微生物还原作用影响, 中期与有机质脱羧作用相关, 晚期与甲烷热氧化流体活动关联。方解石胶结物则受沉积物粒径、钙质成核基底及热演化阶段控制, 铁方解石的形成与深埋流体迁移及离子置换密切相关。页岩方解石对沉积环境具有指示意义: 泥晶方解石组合反映缺氧还原环境, 碳酸盐富集指示深水—半深水沉积背景。页岩中介壳含量不同的岩性组合又能反映不同的古气候、古盐度、古生产力与沉积速率。在页岩的

脆性方面, 方解石作为脆性矿物提升了页岩脆性指数, 促进水力压裂裂缝网络发育, 但其胶结作用亦可能降低孔隙度, 呈现储层改造的“双刃剑”效应。此外, 方解石脉体记录了油气运移过程, 其溶蚀孔与层理缝为页岩油气提供了重要储集空间。本文系统总结了页岩方解石的形态类型, 阐述其形成过程与主控因素, 同时综合分析了页岩中方解石对页岩油气成藏与开发的多重影响, 强调需结合区域地质条件评估其储层效应。未来需深化古老高演化页岩中方解石的成因机制及其与有机质生烃的耦合关系研究, 为富方解石页岩油气的甜点预测与高效开发提供更为完善的理论支撑。

**关键词:** 页岩中方解石; 方解石成因机制; 储层特性; 勘探启示

第一作者简介: 陈泓州 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 油气富集理论与储层特性。Email: geochenhongzhou@163.com

\*通信作者简介: 朱光有 (1973-), 教授级高级工程师; 研究方向: 非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏。Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 成岩作用对低阻油层电阻率的影响

孙玉玺<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2\*</sup>, 季汉成<sup>1</sup>, 齐媛<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组普遍发育低渗透、低电阻率砂岩油层。由于其油水界面模糊且低阻形成机理尚未明确, 当前的勘探开发仍主要依赖于生产测试。以往的研究中, 导电矿物、粘土矿物及地层水矿化度等因素对电阻率的影响被着重讨论。然而, 对于储层成岩作用与电阻率之间的耦合关系研究较为有限。本研究以延长组 2 段低阻油层为例, 采用岩石学、水化学、机器学习以及地质建模等多种方法, 系统探讨低阻油层的形成机理, 并建立储层流体识别方法。研究表明, 姬塬地区低阻油层普遍具有较高的地层水矿化度(平均 88.78 g/L)和束缚水饱和度(平均 67.33%)。在成岩过程中, 地层压实导致的水浓缩作用以及硅酸盐矿物的溶解, 促使  $\text{Na}^+$ + $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$  离子的富集, 增加了地层水矿化度, 并使其向浓缩卤水演化。同时, 硅酸盐矿物的溶解还促使如高岭石等自

生粘土矿物在孔喉中大量堆积, 致使高矿化度地层水被滞留在孔隙中, 最终导致电阻率显著降低。地质模型的分析表明, 低阻油层倾向于富集在溶蚀作用较强的高砂地比、高孔隙度区域。溶蚀作用的增孔效应不仅有利于烃类充注与储集, 同时较大的孔隙( $>10\mu\text{m}$ )能够形成更稳定的导电网络, 进一步影响电阻率测井。此外, 通过结合 XGBoost 与 SVM SMOTE 过采样方法, 模型较好的解决类不平衡问题, 在流体性质识别方面表现出显著优势。可解释性机器学习也进一步为理解低阻油层的形成机理提供了科学依据。这些研究成果将为全球范围内低渗透、低电阻率砂岩储层的评估及预测提供新的见解及实践经验。

**关键词:** 低阻油层; 成岩作用; 电阻率; 致密砂岩; 机器学习

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金(2021D002-0102); 中国石油大学(北京)科研基金(2462023BJR011)

第一作者简介: 孙玉玺(1997-), 在读博士研究生; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: 2860485642@qq.com

\*通信作者简介: 陈亮(1987-), 副教授; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: georabbit1987@hotmail.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 渤海海域太古界变质岩潜山应力差异成储机制

臧春艳

中海油能源发展有限公司 中海油实验中心, 天津 300457

**摘要:**渤海海域近几年在太古界变质岩潜山领域取得了多个重大勘探发现, 累计探明储量超过 6 亿吨。薄片、岩心观察、碳酸盐 U-Pb 年代学分析表明太古界潜山经历了多期次构造运动的影响, 构造应力、风化作用、岩性共同控制了储层的发育程度。研究表明, 岩性对裂缝形成也具有重要影响, 岩心观察表明, 在同一应力背景下, 暗色矿物高含量段其裂缝发育程度远低于长英质岩性段。风化作用大幅度降低了岩石的强度, 对应力更为敏感, 在后期应力作用下更容易形成裂缝; 模拟实验表明, 风化后的岩石其强度降低 3~10 倍, 实际钻井资料统计表明, 风化壳内记录的裂缝期次远高于内幕带。模拟实验表明, 挤压

条件下裂缝生成的规模远大于拉张背景; 构造应力是储层形成的核心控制因素, 早期裂缝奠定了裂缝形成的基础, 晚期对充填裂缝的在活化决定了有效储层的发育; 充填不同矿物的早期裂缝其后期裂缝再活化能力有较大差别, 方解石、黏土矿物、铁质杂矿物充填的裂缝在后期构造运动中更容易受到后期应力改造再活化。宏观上, 早期断裂与晚期断裂密集叠合带储层厚度及净毛比都远高于其它区带, 也是储量高丰度带。

**关键词:**渤海湾盆地; 太古界; 变质岩; 碳酸盐 U-Pb 年龄; 应力成储机制



• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 四川盆地西南部震旦系灯影组气藏多期油充注过程

罗涛, 郭小文\*

中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

四川盆地经历了多期构造隆升事件, 深层-超深层储层中伴随发生多期油气聚集与相态转换过程。古油藏的形成对现今气田分布具有重要控制作用, 但早期油藏记录多已遭受破坏。本文综合运用岩石学、阴极发光、流体包裹体、原位 U-Pb 同位素定年及盆地模拟等方法, 对四川盆地西南部威远地区震旦系灯影组储层多期石油充注过程开展研究。结果表明: 灯影组储层发育葡萄花边状白云岩纹层(LD)及孔洞充填的三期白云石胶结物(CD-1、CD-2、CD-3), 利用白云石 U-Pb 同位素定年和流体包裹体确定其形成时间分别为 542 Ma、486~482 Ma、410 Ma 和 270 Ma。储层中识别出三期沥青的存在(Bit-1、Bit-2、Bit-3), 揭示了三次油充注事件。基于储层岩相学特征确定成岩矿物和固体沥青之间的成岩序列: LD→Bit-1→CD-1→CD-2→Bit-2→CD-3→Bit-3。通过结合

烃源岩生烃模拟与成岩矿物年龄, 确定和约束第一期和第二期油充注分别发生于 500~486 Ma 和 410~400 Ma。加里东期构造隆升对威远古油藏进行了改造, 该事件发生于第二期油充注之后。根据 CD-3 白云石胶结物中次生沥青包裹体伴生的同期盐水包裹体均一温度( $T_h$ )和下寒武统烃源岩主生油期分析, 确定灯影组第三期石油充注时间为 270~230 Ma。其中, 第一期油充注可能来源于陡山沱组烃源岩供给, 而第三期油充注主要来自下寒武统烃源岩供给。该研究揭示了四川盆地西南部多期石油充注时间序列, 为多旋复合叠合盆地油充注期次厘定提供了新的方法体系。

**关键词:** 白云石 U-Pb 定年; 流体包裹体; 油充注; 灯影组储层; 四川盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20B6001)

第一作者简介: 罗涛(1995-), 博士研究生; 研究方向: 储层流体演化与油气成藏。Email: cugluotao@126.com

\*通信作者简介: 郭小文(1980-), 教授; 研究方向: 油气成藏机理。Email: cuggxw@163.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 阳储岭钨钼矿成矿过程的流体包裹体硼-氯同位素示踪

张苗苗, 魏海珍\*, 陆建军

南京大学 地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

斑岩型钨钼矿床是钨资源的重要类型之一, 其形成与花岗质岩浆活动具有密切的成因联系。阳储岭钨钼矿是我国华南燕山期钨钼成矿系统代表性矿床之一, 矿区岩浆活动具有多期次特征, 其成矿物质来源和成矿机制仍存在争议。本研究对阳储岭钨钼矿床不同期次岩石和矿石样品石英流体包裹体显微测温、化学成分和硼-氯同位素组成开展了系统的研究。阳储岭矿区花岗闪长岩和二长花岗斑岩均形成于晚侏罗世(锆石 U-Pb 年龄集中于 143.8~149.8 Ma), 具有一致的岩浆侵位时代。钨钼矿化主要集中在二长花岗斑岩中, 说明成矿过程与二长花岗斑岩有成因联系。总体上二长花岗斑岩  $K_2O$  与  $SiO_2$  呈正相关,  $CaO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $TiO_2$ 、 $P_2O_5$  与  $SiO_2$  呈负相关,  $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$  与  $SiO_2$  无明显联系。呈现典型的高硅( $SiO_2$  含量为 69.3%~71.6%)、富钾( $K_2O/Na_2O > 1.5$ )及弱过铝质特征( $A/CNK = 1.01 \sim 1.05$ ), 其地球化学组成在  $SiO_2$ - $K_2O$  图解中落于高钾钙碱性系列区域。二长花岗斑岩在原始地幔标准化微量元素蛛网图中呈现显著 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常, 其稀土配分曲线具明显 Eu 负异常( $\delta Eu = 0.54 \sim 0.67$ )。Ba-Sr 亏损与钾长石(富 Ba)及斜长石(富 Sr)的晶出相关, P-Ti 负异常反映磷灰石( $Ca_5(PO_4)_3F$ )与钛铁氧化物(如钛铁矿  $FeTiO_3$ )的分离。Eu 亏损反映了斜长石( $Eu^{2+}$  优先进入晶格)的持续分异。以上特征指示了岩浆演化过程中发生了明显的分离结晶作用。二长花岗斑岩 W 含量随 Rb/Ba 比值的升高而升高, 反映随着岩浆

演化 W 在残余熔体中逐渐富集。根据岩相学和矿相学观察, 阳储岭钨钼矿床石英脉分为四个阶段: 成矿前石英脉(Qtz-I)、白钨矿-辉钼矿-石英脉(Qtz-II)、辉钼矿-石英脉(Qtz-III)及石英-硫化物脉(Qtz-IV)阶段。四期石英脉流体相对富 Cl 贫 F ( $F/Cl < 1$ ), 具有低盐度(3.9%~10.2% NaCleq.)的特点, 主要矿化阶段(Qtz-II 和 Qtz-III)的成矿温度范围介于 181~320°C 之间。阳储岭矿床四期石英脉硼-氯同位素组成变化范围较大: Qtz I 的  $\delta^{37}Cl$  值介于 -3.31‰~+0.24‰ 之间, Qtz II 具有较高的  $\delta^{37}Cl$  值 (-1.66‰~+3.38‰), Qtz III 的  $\delta^{37}Cl$  值变化较大 (-3.31‰~+3.34‰), Qtz IV 样品的  $\delta^{37}Cl$  值变化范围为 -3.03‰~+3.29‰。Qtz I  $\delta^{11}B$  值介于 -10.83‰~0.78‰ 之间, Qtz II 具有高的  $\delta^{11}B$  (-8.67‰~+2.98‰), Qtz III 样品的  $\delta^{11}B$  值介于 -7.22‰~+5.61‰ 之间。Qtz IV 的  $\delta^{11}B$  变化范围最大 (-10.58‰~+3.08‰)。流体包裹体硼-氯同位素表明, 早期成矿流体以岩浆流体为主。成矿期流体(Qtz-II 和 Qtz-III)  $\delta^{37}Cl$  和  $\delta^{11}B$  变化较大, 数值模拟指示存在流体与二长花岗斑岩强烈的水岩作用, 反映了白钨矿和辉钼矿矿化受到围岩蚀变的控制。Qtz-III 阶段流体包裹体  $\delta^{11}B$  显著偏高, 端元混合模型数值模拟反映了辉钼矿矿化阶段受到地表流体混合作用的影响。

**关键词:** 斑岩型钨钼矿床; 流体包裹体; 硼-氯同位素; 成矿过程示踪

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830428)

第一作者简介: 张苗苗(2001-), 硕士研究生; 研究方向: Cl 同位素在矿床研究中的应用。Email: 5022290022@smail.nju.edu.cn

\*通信作者简介: 魏海珍(1977-), 教授; 研究方向: 矿床同位素地球化学。Email: haizhenwei@nju.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## U-Pb 年代和团簇同位素温度约束深大断裂控制的热液白云岩成因机理新见解

高和婷, 朱光有\*, 李茜, 李生

长江大学, 武汉 430100

热液白云岩化 (Hydrothermal dolomitization, HTD) 是碳酸盐岩成岩作用的关键过程, 其通过热液流体驱动的白云石置换方解石机制 ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  对  $\text{CaCO}_3$  的置换), 形成优质储层及矿产资源载体 (如 MVT 铅锌矿)。然而, 关于 HTD 的形成时间 (深埋藏 vs 浅埋藏) 及构造-流体耦合机制仍存在重大争议。传统观点认为, HTD 是深埋藏阶段 (数千米深度) 基底断裂活化引发热液长期作用的结果, 但近年研究提出浅埋藏 (<1 km) 同沉积-早成岩阶段热液白云岩化的直接证据, 挑战了传统成因模型。争议核心在于明确白云化时限、流体性质及断裂活动的时空关联性。全球典型实例 (如西班牙坎塔布连带、伊朗扎格罗斯盆地、加拿大西部盆地及中国四川盆地) 表明, HTD 广泛发育于断裂带附近, 但其成因机制受控于基底断裂活化与同沉积断裂作用的动态耦合。传统研究依赖埋藏史模拟及岩相学分析, 但因缺乏高精度年代学约束, 难以直接解析成岩过程与构造事件的动态联系。近年来, 原位 U-Pb 定年、流体包裹体测温及团簇同位素 ( $\Delta 47$ ) 等新技术突破, 为重建“时间-深度-流体”三元耦合关系提供了新途径。例如, U-Pb 年代学可直接获取白云石绝对年龄; 流体包裹体揭示古流体温度与成分演化;  $\Delta 47$  温度计则能反演成岩环境热历史, 示踪流体来源。基于这些技术, 学者提出浅埋藏断控热液白云石化 (FHTD) 模型: 同沉积断

裂活动触发海水对流循环, 基底碎屑含水层加热形成高温流体 (>80°C), 驱动早期白云岩化 (如加拿大寒武系、英国德比郡实例)。四川盆地中二叠统栖霞-茅口组是断控热液白云岩研究的天然实验室, 记录了断裂活化-流体运移-成岩响应的复杂过程。本文通过整合 U-Pb 年代学、团簇同位素温度分析、地球化学 (C-O 同位素、微量-稀土元素) 及阴极发光显微技术, 首次系统约束四川盆地 FHTD 的绝对成岩时间, 揭示其与峨眉山幔柱活动及区域断裂活化的时空关联。研究表明, 栖霞-茅口组白云岩化发生于浅埋藏环境 (<1 km), 与同沉积断裂诱导的热液循环同步, 且热液流体为混合成因 (岩浆热液与大气降水)。结合全球案例对比, 提出 FHTD 早期成因的普适性模式: 同沉积断裂系统通过基底活化形成热液通道, 浅层高温流体 (受火山活动或构造挤压驱动) 沿断裂快速运移, 触发局部白云岩化, 其时间窗口与基质白云岩形成接近。本研究为突破传统深埋藏成因理论提供了关键证据, 强调构造-流体-成岩动态耦合对 FHTD 的控制作用, 不仅深化了对“白云岩之谜”的成因理解, 也为全球碳酸盐岩储层预测、矿产勘探及碳封存靶区评价提供了新视角。

**关键词:** 热液白云岩; 深大断裂体; 原位 U-Pb 定年; 团簇同位素; 构造-流体耦合

第一作者简介: 高和婷 (1997-), 女, 博士研究生; 研究方向: 沉积储层、沉积地球化学, 矿产普查与勘探。Email: 2021710491@yangtzeu.edu.cn  
\*通信作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 教授级高级工程师; 研究方向: 深层油气地质与成藏。Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 晚侏罗世—早白垩世真极移事件对鄂尔多斯盆地 油气成藏的影响探究

王好萱, 韩非\*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430199

晚侏罗世—早白垩世在地球地质历史时期中是很重要的时段, 在此期间发生的真极移事件对全球地质构造、沉积环境以及生物演化等产生了深远的影响。真极移是指整个固体地球(地壳和地幔)相对于液态外核发生旋转的过程, 真极移过程中, 地球自转轴突然大幅偏移, 使得地球表面各点相对于地磁极的位置发生改变, 进而使各大陆板块古纬度出现显著的变动。鄂尔多斯盆地作为我国北方重要的含油气盆地, 横跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古和山西五省区, 其独特的地质构造与漫长的演化历史, 造就了极为丰

富的油气资源, 涵盖了多种油藏类型, 在我国油气资源领域占据着举足轻重的地位。就鄂尔多斯盆地古纬度的变化而言, 其受真极移的影响所引发, 这一系列的变化又致使古环境产生了诸多改变, 而这些古环境的变化, 实则对油气成藏的过程产生了深远的影响。深入研究真极移对鄂尔多斯盆地古纬度演变的影响, 并揭示其环境效应与油气成藏过程之间的内在联系, 具有重要的学术价值和实际意义。

**关键词:** 真极移; 古纬度; 古环境; 油气成藏

第一作者简介: 王好萱(2003-), 本科生。Email: 13993425419@163.com

\*通信作者简介: 韩非(1989-), 副教授, 研究方向: 古地磁、岩石磁学和环境磁学。Email: hanfei@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 基于流体包裹体的川西龙门山中段磷矿集区古气候环境变化的分辨率重建

姚毅<sup>1,2\*</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 石亮<sup>1,2</sup>, 刘军省<sup>3,4</sup>, 何良<sup>1,2</sup>, 贺天全<sup>10,11</sup>,  
李晓龙<sup>8,9</sup>, 徐磊<sup>5,6,7</sup>

1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 长沙 410012;
6. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
7. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 长沙 410012;
8. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077;
9. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077;
10. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;
11. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

川西龙门山中段作为中国重要的磷矿资源地,其磷矿床的形成与古海洋环境紧密相关,而流体包裹体则保存了成矿时期的原始流体信息。磷矿作为战略性非金属矿产资源,对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。因此,本研究旨在通过分析川西龙门山中段磷矿集区中流体包裹体的特征,重建该区域古气候环境变化的高分辨率历史,为磷矿资源的勘探与评价提供重要的地球化学依据。本研究采用显微测温测压技术、稳定同位素分析、微量元素地球化学分析等方法,对磷矿样品中的流体包裹体进行了系统的采集和分析。通过对流体包裹体中水的氧同位素和氢同位素的测定,能够恢复古气候环境的温度和降水条件。同时,包裹体中的盐度、压力和气体成分分析,为理

解古海洋化学环境提供了重要信息。结合区域地质背景和地球物理数据,本研究重建了川西龙门山中段磷矿集区在不同地质时期的古气候环境,揭示了其与区域构造活动、海平面变化和生物事件的耦合关系。研究表明,川西龙门山中段磷矿集区的成矿作用与古气候环境变化有着密切的联系。在特定的古气候背景下,流体活动的变化直接影响了磷矿的沉淀和富集。此外,本研究还发现,磷矿集区的古气候环境变化与全球古气候模式具有一定的同步性,表明区域性气候事件可能受到全球性气候因素的影响。这为理解全球气候系统的演变提供了新的地质证据。

**关键词:** 龙门山中段; 磷矿集区; 流体包裹体; 古气候环境; 高分辨率重建

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 利用 C<sub>7</sub> 轻烃碳、氢同位素判识轻质/凝析油的母源沉积环境 ——以塔里木盆地为例

邓晗宇<sup>1</sup>, 程斌<sup>2\*</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心 实验测试中心, 武汉 430205;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510340

轻质/凝析油热成熟度普遍较高, 其生物标志物浓度低且常趋于均一化, 导致传统生物标志物参数的指示意义存在不确定性。我们对塔里木盆地塔北、库车、塔西南等地区的 114 个轻质/凝析油中甲苯(Tol)、正庚烷( $nC_7$ )、甲基环己烷(MCH)的组成及其碳、氢同位素特征进行了分析。结果表明, 海相、湖相和煤系轻质/凝析油中 MCH, Tol 和  $nC_7$  氢同位素分别深“V”型、浅“V”型和倒“V”型分布。通过分析这些 C<sub>7</sub> 轻烃之间的氢同位素差值, 我们发现其  $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$  与  $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$  呈良好的线性相关性 ( $R^2=0.8$ ), 其中海相、陆相以及煤系轻质/凝析油的  $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$  分别为  $>6\text{‰}$ 、 $-20\text{‰}\sim 20\text{‰}$  和  $<-20\text{‰}$ ,  $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$  值分别为  $<-5\text{‰}$ 、 $-30\text{‰}\sim 0\text{‰}$  和  $> 0\text{‰}$ 。因此, 提出  $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$  与

$\Delta\delta D_{Tol-MCH}$  关系图版可以较好判识海相、湖相和煤系烃源岩来源的轻质/凝析油。根据此图版, 我们认为库车坳陷西部和东部的轻质/凝析油分别来源于湖相和煤系母质, 同时利用  $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$  与 Tol/MCH 的关系图可以进一步识别库车坳陷轻质/凝析油经历的气侵作用。库车坳陷 C<sub>7</sub> 化合物碳同位素差值  $\Delta\delta^{13}C_{Tol-nC_7}$  与  $\Delta\delta^{13}C_{nC_7-MCH}$  同样呈良好的线性关系 ( $R^2=0.74$ ), 结合多个参数多元统计分析, 认为沉积相的转变控制了库车坳陷东、西部轻质/凝析油的 C<sub>7</sub> 轻烃同位素的地球化学差异。

**关键词:** C<sub>7</sub> 轻烃; 碳、氢同位素; 轻质/凝析油; 油气来源; 塔里木盆地

基金项目: 轻质油/凝析油藏中 C<sub>7</sub>-C<sub>11</sub> 芳烃化合物的演化特征及其地球化学意义 (42272144)

第一作者简介: 邓晗宇 (1996-), 男, 博士; 研究方向: 油气地球化学。Email: 1006420861@qq.com

\*通信作者简介: 程斌, 男, 副研究员; 研究方向: 有机地球化学。Email: chengbin@gig.ac.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## Doseo 盆地下白垩统 Kedeni 组成岩相的差异性演化及储集层物性控制因素

齐媛<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2\*</sup>, 孙玉玺<sup>1</sup>, 季汉成<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

Doseo 盆地位于中非剪切带, 构造活动复杂, 勘探潜力巨大。由于前期勘探水平有限, 储层特征及储层控制因素尚不明确, 制约了后续油气勘探开发。基于薄片鉴定、物性测试、扫描电镜、X 射线衍射分析、碳氧同位素分析, 结合地热历史和埋藏历史, 明确了 Doseo 盆地下白垩统 Kedeni 组的成岩相类型, 建立了成岩序列与孔隙定量演化模型, 探讨了研究区的储层控制因素与成岩作用差异性演化。研究结果表明: Doseo 盆地 Kedeni 组储层岩石类型主要为长石英砂岩和石英砂岩, 孔隙类型属原生与次生孔隙复合型, 为中孔-中渗储层。Kedeni 组因其水下支河道砂岩粒径大, 石英等刚性颗粒含量高, 储集层物性好。将砂岩储层分为 3 种成岩相: 强压实相、中等压实-溶蚀相和胶结相, 其中, 中等压实-溶蚀相为优质成岩相, 主要分布在 kedeni 组上部。储层物性受压

实作用影响最大, 是造成原生孔隙减小的关键因素; 胶结作用次之, 胶结相中广泛发育高岭石和自生石英, 严重堵塞孔隙。溶蚀作用是改善储层孔渗性能的主要因素, 主要表现为长石粒间和粒内容蚀, 形成大量中等压实-溶蚀相。中等压实-溶蚀相中溶蚀作用的根本原因与开始于早成岩期 B 末期的烃源岩有机质热演化过程有关, 其产生的有机酸和 CO<sub>2</sub> 使地层流体环境逐渐呈酸性, 发生强烈溶蚀。石英颗粒的溶蚀发生在中成岩作用阶段 B 末期, 此时有机酸耗尽, 流体环境开始向弱碱度转变, 少量石英颗粒溶解。溶蚀效应显著改善了 Kedeni 组储层物性, 形成了中孔-中渗的优质储层。

**关键词:** 成岩相; 有机质热演化; 地质流体; 成岩作用; 储层孔隙演化

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金(2021D002-0102)、中国石油大学(北京)科研基金(2462023BJR011)

第一作者简介: 齐媛(1997-), 在读博士研究生; 研究方向: 沉积学与储层地质学。Email: 2024310007@student.cup.edu.cn

\*通信作者简介: 陈亮(1987-), 副教授; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: georabbit1987@hotmail.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 中国东部盆地古近纪海侵与油气生成： 来自石盐流体包裹体的证据

孟凡巍

中国矿业大学 资源与地球科学学院, 徐州 221116

在晚白垩纪到古近纪期间, 中国东部形成了广泛的内陆含盐油气盆地, 占全国石油产量的一半。1979 年, 在胜利油田发现的海生枝管藻与龙介虫化石之后, 引发了该地区是否受到海侵的争论, 受到海侵影响的地层通常富含蒸发岩, 并且是重要的烃源岩。本次研究对中国东部对不同盐盆中石盐中的流体包裹体的卤水主要成分分析显示以下浓度: 在金坛盆地,  $K^+$  为 0.7~15.8 g/L,  $Mg^{2+}$  为 1.1~5.8 g/L,  $SO_4^{2-}$  为 3.7~27.7 g/L; 在云应盆地,  $K^+$  为 2.8~8.8 g/L,  $Mg^{2+}$

为 4.8~7.3 g/L,  $SO_4^{2-}$  为 5.2~36.5 g/L; 在黄冈盆地,  $K^+$  为 2.4~4.8 g/L,  $Mg^{2+}$  为 5.1~6.9 g/L,  $SO_4^{2-}$  为 5.0~5.2 g/L。数值投在 Jänecke 图上, 部分数据与同时代蒸发海水成分相似, 表明盐岩的形成受到海水的影响, 但是随着陆相水体输入逐渐将海相卤水转变为陆相卤水。

**关键词:** 石盐; 流体包裹体; 海侵; 古近纪; 烃源岩



• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 深层油气排烃和储集过程中流体演化与同位素年代学研究： 以塔里木盆地旗探 1 井为例

陈笑，黄亚浩\*

长江大学 资源与环境学院，武汉 430000

深层—超深层油气具有漫长的流体演化过程和复杂的油气成藏机理，塔里木盆地是目前中国最典型的深层-超深层勘探开发领域，塔里木盆地目前仅有少数井揭示了下古生界震旦—寒武系烃源岩层和储集层，但缺乏震旦—寒武系油气从源到储过程中直接的同位素年代学研究，限制了塔里木盆地万米深层油气成藏机理的认识。本文分别以源—储层段（寒武系玉尔吐斯组和震旦系奇格布拉克组）孔缝洞充填脉体为研究对象，明确多期脉体的流体来源和成因，基于流体包裹体分析结合 U-Pb 同位素定年和 Re-Os 同位素定年，阐明深层油气动态成藏过程。结果表明塔北地区寒武系玉尔吐斯组烃源岩两期方解石脉体均为热液成因且表现为深部富锶流体来源。对应的震旦系奇格布拉克组储层中发育两期白云石孔洞充填型脉体，稀土元素配分模式显示储层中两期流体都表现出成岩流体来源，其中第二期白云石脉体锶同位素表现为寒武系同期海水来源。寒武系玉尔吐斯组存在两次生烃高

峰，U-Pb 同位素数据表明第一次生烃高峰为中奥陶统时期（ $460\pm 10$  Ma），与震旦系奇格布拉克组储层中油气成藏过程具有相同的时空匹配关系。U-Pb 同位素数据显示海西晚期玉尔吐斯组烃源岩进入第二次生烃高峰（ $263\pm 69$  Ma），而震旦系储层中的第二期白云石脉体 U-Pb 定年结果为  $55\pm 15$  Ma（始新统早期），可以看出深层烃源岩生烃和储层成藏存在时间差异，差异主要由于寒武系烃源岩的源内滞留特征。储层中晚于第二期白云石脉体发育大量固体残余沥青（ $30\pm 14$  Ma），表明震旦系油气藏在渐新统早期发生油气破坏和调整改造过程，对应于喜山晚期的构造抬升导致。通过对塔里木盆地深层源储的系统性同位素年代学研究和流体演化分析，明确了下古生界震旦—寒武系烃源岩生烃、排烃、储层内油气成藏以及保存过程。

**关键词：**深层油气；流体包裹体；同位素年代学；塔里木盆地

基金项目：国家自然科学基金项目“深层碳酸盐岩储层流体活动示踪油气差异成藏效应研究—以塔里木盆地富满油田为例”（42302154）；中国石油碳酸盐岩储层重点实验室开放基金项目“深层走滑断裂带储层流体活动差异性及油气成藏响应研究—以塔里木盆地富满地区为例”（RIPED-2022-JS-2382）

第一作者简介：陈笑（1999-），女，在读硕士研究生；研究方向：油气成藏机理。Email: 1043440046@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2719-5070>, Tel: 13103679095

\*通信作者简介：黄亚浩（1990-），男，博士，副教授；研究方向：油气成藏机理。Email: [hyhtr08916@163.com](mailto:hyhtr08916@163.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4952-1320>, Tel: 18995641516

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## Diagenetic facies, volcanic tuffaceous sediment and its diagenetic features in deeply buried tight sandstone, Shan2-He 1 Members, Ordos Basin, China

卢志远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

Diagenetic processes play a crucial role in the evaluation of tight reservoir quality. We aimed to examine diagenetic facies and assess reservoir quality through an integrated analysis of petrology, mineralogy, mercury-injection, stable isotopic, porosity, and permeability of core samples from the Permian Shan 2 and He 1 Members in the Ordos Basin. The sandstone reservoirs display relatively poor petrophysical properties, with average porosity and permeability values of 6.07% and 0.434 mD, respectively. Early compaction and precipitation of diagenetic minerals have significantly reduced primary pore space, although certain sandstones have retained anomalously high porosity. The high-porosity reservoirs are influenced by multiple many factors, with dissolution being a predominant mechanism. It is inferred that CO<sub>2</sub> and organic acids generated during the thermal maturation of organic matter may have promoted the dissolution of clasts, VTS, and calcite, thereby improving the physical reservoir properties. Detailed petrographic observation and assessments of the primary minerals, mineral genesis, and diagenetic process revealed seven distinct diagenetic facies based on sand-grain populations, types of cementation, clay

matrix contents, and volcanic tuffaceous sediment (VTS). The main interstitial fills consist of VTS, clay minerals, quartz overgrowths, and calcite (ferrocalcite). Clast and VTS dissolved sandstone and VTS dissolved sandstone mainly formed Class I reservoirs with highly unstable grains and good secondary pores resulting from the dissolution of grains and VTS. VTS tight sandstone, siliceous cementation tight sandstone, illite-siliceous cementation tight sandstone, and calcite cementation tight sandstone formed Class II reservoirs with high interstitial-fill and cementation rates. Illite cementation tight sandstone tightly cemented by illite, which has poor reservoir properties, mainly formed Class III reservoirs. This classification underscores the critical importance of understanding diagenesis, diagenetic facies, and VTS diagenetic features for accurate reservoir quality assessment. A comprehensive understanding of diagenesis, diagenetic facies, and VTS alterations in diagenetic processes may contribute to more effective hydrocarbon exploration and exploitation.

**关键词:** diagenetic facies; diagenesis; reservoir assessment; Shan 2-He 1 Mbr; Ordos Basin

· 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 ·

## 川中地区中二叠统白云岩储层成岩流体年代学与地球化学示踪

潘立银, 王永生, 梁峰

中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

在过去的十多年间, 四川盆地川中古隆起中二叠统深埋碳酸盐岩中发现了数个大型气田。储层表征工作揭示, 优势储集相主要分布在白云岩层段, 白云岩通常为薄层, 发育包含晶间孔、粒间孔、生物铸模孔、裂缝、溶蚀孔洞等在内的多种储集空间, 暗示经历了复杂的成岩历史。本研究对这些白云岩开展了综合的宏观—微观岩石学、碳-氧-锶同位素地球化学以及  $\Delta_{47}$ /U-Pb 热年代学 (即团簇同位素测温与激光原位 U-Pb 定年结合) 分析, 以精细揭示这些白云岩储层的成岩条件及其演化过程。钻井岩心及薄片观察显示, 这些白云岩由两类白云石构成: 一是交代白云石, 它们影响了浅海台地相的泥粒灰岩与颗粒灰岩; 二是鞍状白云石, 它们交代较早的碳酸盐矿物相或沿裂缝/孔洞充填。多数交代白云石呈斑驳状阴极发光, 说明存在后期成岩蚀变; 相比之下, 鞍状白云石呈现均一的暗红色阴极发光, 有些具有规则的环带, 表明后期成岩蚀变弱。后期成岩蚀变程度最弱的交代白云石具有最老的 U-Pb 年龄, 为  $286 \pm 10$  Ma 至  $274.5 \pm 9.9$  Ma, 与地层沉积年龄极为接近; 同时, 其团簇同位素 ( $\Delta_{47}$ ) 温度可低至  $30 \sim 52$  °C, 碳同位素和锶同位素组成与中二叠世海水非常接近, 因此为早成岩阶段低温海水白云石化事件提供了新证据。在中二叠世拉

张背景下, 海水可通过渗透—回流或热对流机制大规模流经碳酸盐沉积物, 从而导致白云石化。相比之下, 遭受过明显成岩蚀变的交代白云石具有明显年轻的 U-Pb 年龄, 为  $\sim 270$  Ma 至  $230$  Ma, 它们跟裂缝和溶洞中充填的鞍状白云石胶结物在年龄及稳定同位素组成上几乎一致, 记录了热液流体对白云岩围岩的改造事件。鞍状白云石微观岩石学特征及 U-Pb 定年结果清晰地揭示了发生在晚二叠世、中—晚三叠世期间的至少两期热液流体事件。同时, 鞍状白云石的形成温度及氧、锶同位素垂向变化特征暗示, 热液流体源自盆地深部、呈垂向运移特点。结合区域地球动力学, 热液流体事件极可能与峨眉山大火成岩省及盆地构造反转背景下的走滑断裂多次活化有关。走滑断裂活动及伴随的热液流体通过破裂、角砾化及溶蚀作用显著提升了白云岩围岩的孔隙度和渗透率。上述成岩改造事件发生在烃源岩成熟前, 为原油充注及后期裂解成气提供了有效储集空间。本次研究整合传统和新兴技术手段, 精细刻画了受早期海水及晚期多期热液流体控制的白云岩储层的形成演化过程。

**关键词:** 成岩流体; 白云岩; 中二叠统; 川中地区; 四川盆地

· 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 ·

## 方柱石 Cl-Br 标样研制及在成矿流体示踪中的应用

邱正杰, 范宏瑞, 卫钦迪, 黄亮亮

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国家重点实验室, 北京 100029

地壳流体是地球科学研究的热点, 而挥发分又是沉积、岩浆、变质和成矿环境中热液流体源区的良好示踪剂。氯和溴是高度极不相容的元素, 通常富集于熔体、流体以及相关的含挥发分矿物中。不同流体储库的 Cl/Br 比值存在较大差异, 不同来源流体的混合程度也可以通过 Cl/Br 比值和 Br 含量表征。目前, 离子色谱、中子活化技术和惰性气体分析技术已广泛用于测定地质样品中的 Cl-Br 含量。采用上述分析技术获得的是群体流体包裹体组合的 Cl-Br 平均值, 而天然样品往往存在不同世代的流体包裹体组合, 因此采用全岩分析技术很难得不同世代流体包裹体的信息, 迫切需要研发适用于单个流体包裹体原位 Cl-Br 元素分析的矿物标样。方柱石是一种富含挥发分的铝硅酸盐矿物, 由三个端元组成: 钠柱石 ( $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$ )、钙柱石 ( $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$ ) 和硫酸方柱石 ( $[\text{CaNa}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4]$ )。此外, 方柱石稀土元素的含量极低, 可作为 LA-ICP-MS 测定矿物或流体包裹体中 Cl-Br 元素的标准物质使用。目前国际上成功开发用于 LA-ICP-MS 分析的天然方柱石标样只有 3 个颗粒 (SP、SY 和 BB1), 供应量不足, 难以满足

未来对单个流体包裹体挥发分 S-Cl-Br 含量分析的需求。针对上述问题, 本次研究开展方柱石 Cl-Br 元素标准物质研制, 改进了激光微区 Cl-Br 元素分析技术, 为成矿流体的源区示踪提供了技术支撑。本次研究开发的坦桑尼亚方柱石 (TSNY) 和马达加斯加方柱石 (MDJ) 的均一性好, 准确度优于前人开发的标样。以华北克拉通中部造山带内变沉积岩容矿型铜钴矿床作为研究案例, 确认方柱石 Cl/Br 比值可以有效指示深度地壳流体的来源和演化。该类型矿床成矿流体的盐度很高, 但其流体来源存在争议: 1) 深部岩浆流体; 2) 盆地卤水循环进入深部地壳; 3) 含蒸发岩地层的退变质溶解。分别对容矿围岩中变质成因和热液交代方柱石开展原位高精度 Cl 和 Br 含量分析。研究表明: 自形方柱石整体的 Cl/Br 比值高暗示存在石盐溶解流体形, 仅窄边部 Cl/Br 比值较低, 暗示晚期有浅部盆地卤水参与成矿。

**关键词:** 方柱石; Cl/Br 比值; 成矿流体; 示踪; 变沉积岩容矿铜钴矿床

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

## 页岩中有机-无机相互作用机制及其对页岩储层的影响

黄月, 朱光有\*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430000

页岩中的有机-无机相互作用对页岩油气的生成和储集具有重要影响。本文系统综述了页岩中有机质与黏土矿物的相互作用机制及其对页岩油气储层演化的影响。通过整合沉积至成岩阶段的关键过程, 揭示了黏土矿物通过配体交换、阳离子桥接等机制对有机质的选择性吸附与富集作用, 阐明了有机酸溶蚀矿物驱动次生孔隙形成的协同效应, 并探讨了蒙脱石伊利石化与有机质生烃的耦合机制。黏土矿物类型与有机质赋存形式的差异显著影响吸附效率和生烃路径, 而有机酸溶蚀作用通过溶蚀无机矿物释放金属离子, 一方面形成次生孔隙另一方面促进矿物转化和次生矿物生成, 协同塑造了页岩储层的孔隙结构与脆性特征。在有机-无机协同成孔效

应的影响下, 阐述了利用分子动力学模拟研究的页岩纳米孔隙中流体的吸附行为, 揭示了孔隙壁面润湿性对页岩油赋存状态的关键调控作用。最后总结了常用的研究有机物与黏土矿物相互作用的分析技术的应用进展。尽管在有机-无机相互作用上取得了一些进展, 但各种无机矿物与有机质之间以及矿物转化过程与有机质生烃过程的耦合变化仍存在不确定性。未来的研究应聚焦于不同有机-无机组合耦合演化的微观过程, 以及有机-无机复合孔隙中多组分流体的竞争吸附机制。

**关键词:** 有机-无机相互作用; 矿物吸附; 有机质富集; 有机-无机协同成孔; 纳米孔隙

第一作者简介: 黄月 (2003-), 女, 在读硕士研究生, 地质资源与地质工程专业。Email: 18171262022@163.com

\*通信作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师; 研究方向: 深层油气地质与成藏研究。Email: zhuguangyou@petrochina.com.cn