

doi: 10.12029/gc20220514

庞康, 吴柏林, 孙涛, 郝关清, 雷安贵, 杨松林, 刘池阳, 傅斌, 权军明, 王苗, 郝欣, 刘明义, 李琪, 张效瑞. 2022. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿碳酸盐岩碳氧同位素及其天然气-水混合流体作用特征[J]. 中国地质, 49(5): 1571-1590.

Pang Kang, Wu Bolin, Sun Tao, Hao Guanqing, Lei Angui, Yang Songlin, Liu Chiyang, Fu Bin, Quan Junming, Wang Miao, Hao Xin, Liu Mingyi, Li Qi, Zhang XiaoRui. 2022. Characteristics of natural gas-water mixed fluid and carbon oxygen isotopes of carbonatite in the sandstone uranium deposits, Ordos Basin[J]. Geology in China, 49(5): 1571-1590(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿碳酸盐岩碳氧同位素及其 天然气-水混合流体作用特征

庞康^{1,2}, 吴柏林¹, 孙涛², 郝关清², 雷安贵³, 杨松林³, 刘池阳¹, 傅斌⁴, 权军明²,
王苗¹, 郝欣¹, 刘明义¹, 李琪¹, 张效瑞¹

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100; 3. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 4. 澳大利亚国立大学地球科学学院, 堪培拉 2601)

摘要:【研究目的】本文以杭锦旗一大营铀矿为研究区, 研究了矿床的碳酸盐化类型、期次和原位微区碳氧同位素特征, 为该区砂岩型铀矿的形成及成因认识提供了新的信息和依据。【研究方法】采用野外调研、工业孔含矿层位岩芯采集、高倍显微镜观察、电子探针图像分析等方法, 区分不同期次的碳酸盐化(主要是方解石), 在此基础上运用 SHRIMP 稳定同位素示踪技术进行 C-O 同位素测试, 为更加精确示踪砂岩铀矿形成过程提供了合理的途径。【研究结果】利用原位微区碳氧同位素示踪技术分析了铀成矿期及成矿期后流体特征, 显示具有有机质来源的特点, 其中方解石的氧同位素显示流体具有大气水作用的特点, 认为天然气向北部运移耗散与地下水形成的低温混合热液流体为它们提供了碳质来源。本区“钙化木”状碳酸盐化的方解石多显示沿晶洞分布或沿裂隙贯穿, 明显为成矿期后天然气沿裂隙充填的结果; 因此, 天然气-水混合流体作用从成矿期可一直延至成矿期后, 具有叠加富集及保矿作用。【结论】采用电子探针和镜下观察相结合的方法, 在区分不同期次方解石的基础上, 原位微区稳定同位素示踪技术为精细研究砂岩型铀矿成矿流体特征提供了有效的技术支撑。

关键词:碳酸盐化; 原位微区; 砂岩型铀矿; SHRIMP SI; 碳氧同位素; 矿床成因; 油气勘查工程; 鄂尔多斯盆地

创新点:采用了原位微区稳定同位素测试方法, 在区分碳酸盐期次的基础上, 研究方解石 C-O 同位素特征, 从而示踪矿床成因, 与以前混合样品的 C-O 同位素示踪相比, 提高了数据的可信度和精度。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1571-20

Characteristics of natural gas-water mixed fluid and carbon oxygen isotopes of carbonatite in the sandstone uranium deposits, Ordos Basin

PANG Kang^{1,2}, WU Bolin¹, SUN Tao², HAO Guanqing², LEI Angui³, YANG Songlin³, LIU Chiyang¹,
FU Bin⁴, QUAN Junming¹, WANG Miao¹, HAO Xin¹, LIU Mingyi¹, LI Qi¹, ZHANG Xiaorui¹

收稿日期: 2020-10-18; 改回日期: 2022-09-22

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(重点)项目(2022JZ-18)、辽河油田公司科技项目(2021KJ-07-3)及中国地质调查局项目(2015CB453003, DD20211550)联合资助。

作者简介: 庞康, 男, 1992年生, 工程师, 主要从事铀矿地质勘探及同位素示踪; E-mail: 752470431@qq.com。

通讯作者: 吴柏林, 男, 教授, 1967年生, 博士生导师, 主要从事铀矿地质学研究; E-mail: wbailin@126.com。

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co., Ltd., Xi'an 710100 Shaanxi, China; 3. Exploration and Development Institute, Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, Liaoning, China; 4. Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra 2601, Australia)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering

[Objective] This paper takes Hangjinqi–Daying Uranium deposit as the research area, and we studied the carbonation type, period and the characteristics of in-situ micro-zone carbon and oxygen isotopes, providing a new information and basis for the formation and cause of sandstone uranium deposits in this area. **[Methods]** By using the field observation, rock core collection of industrial hole in ore-bearing horizon, high power microscope observation, electron probe analysis, we distinguished the different stages of Carbonation (Mainly calcite). The C–O isotope test was carried out by using the SHRIMP stable isotope tracer technology, which provides a reasonable and more accurate way to tracing the formation process of sandstone uranium deposit. **[Results]** Both the mineralization period and post mineralization period of fluid have the source of genetic characteristics by using in-situ micro-area C–O isotopes testing method, and the oxygen isotope of calcite shows that the fluid has the characteristics of atmospheric water. It is believed that the natural gas moved to the north together with the groundwater forming the low-temperature hydrothermal fluid provided the carbon source. The "calcified wood"-like carbonated calcite in this area is mostly distributed along crystal caves or penetrated along cracks, and it is obviously the result of natural gas filling along the cracks in post mineralization period. Therefore, the natural gas–water mixed fluid effect can be extended to post mineralization period, which has the effect of superimposed enrichment and mineral preservation. **[Conclusions]** The application of electron probe, SHRIMP stable isotope tracing and other methods provide the core technical guarantee for in-situ micro-area stable isotope tracing, and provide an effective test method for the fine study of the characteristics of ore-forming fluids.

Key words: carbonation; in-situ micro-area; sandstone uranium deposit; SHRIMP SI; carbon and oxygen isotopes; origin of the deposit; oil and gas exploration engineering; Ordos Basin

Highlights: In-situ micro-area stable isotope test method was used to study the C–O isotope characteristics of calcite on the basis of distinguishing carbonate stages, in order to trace the genesis of the deposit. Compared with previous C–O isotope tracer work of mixed samples, the reliability and accuracy of the data are improved.

About the first author: PANG Kang, male, born in 1992, engineer, mainly engaged in uranium geological exploration and isotope tracing; E-mail: 752470431@qq.com.

About the corresponding author: WU Bolin, male, born in 1967, doctor candidate supervisor, mainly engaged in uranium geology research; E-mail: wbailin@126.com.

Fund support: Supported by Natural Science Basic Research Program (Key) of Shaanxi (No. 2022JZ–18); Technology Project of Liaohe Oilfield Company (No. 2021KJ–07–3); the project of China Geological Survey (No. 2015CB453003, No. DD20211550).

1 引 言

同位素在地质领域的应用主要有两个方向,一是根据放射性同位素衰变原理测定地质体的形成时代,简称测年;二是利用稳定同位素特征来揭示地质历史时期的成矿作用过程与环境,简称示踪。近20多年来,国内外学者在与砂岩型铀矿相关的后生蚀变稳定同位素领域开展了一些研究工作, Kirkland et al. (1995) 研究俄克拉荷马州的油气耗散蚀变作用时发现, Cement 油田 CH₄ 为该地区碳酸盐提供碳源, 黄铁矿的形成与生物对油气流体的作

用有关; Chan et al. (2000) 对美国犹他州南部侏罗纪地层蚀变砂岩进行 Sr–C–O 同位素测试, 发现周围氧化砂岩与漂白砂岩同位素组成相近, 砂岩中方解石的部分碳源来自于油气流体中的有机碳。近年来国内砂岩型铀矿稳定同位素示踪主要集中在 S、C、O 同位素。一些学者对鄂尔多斯盆地北部铀矿区透镜状钙质砂岩及方解石晶体进行 C–O 同位素测试, 发现其具有有机质来源的特征、碳源来自有机质、与上古生界气源岩与地表水的混合作用有关 (吴柏林等, 2005, 2014, 2016; 樊爱萍, 2007; 汤超等, 2014, 2016; 冯乔等, 2016; 张龙等, 2016), 可能

还与下古生界海相碳酸盐岩和深部油气相混合有关(杨晓勇等,2007);对矿石中的黄铁矿S同位素示踪,发现上古生界煤成气及微生物对有机质的分解作用为黄铁矿提供了硫源(魏安军,2014;吴柏林等,2016;孙莉,2016)。对新疆十红滩铀矿床稳定同位素研究发现成矿期黄铁矿具有有机质来源的特征、与硫酸盐还原菌作用有关;产物钙质砂岩方解石形成主要与地层中有机质的脱羧基作用有关(朱西养等,2005;乔海明,2006)。但上述同位素的研究测试工作,所采用的样品均是全岩或挑选的混合矿物;因样品可能期次不同,成因类型也可能复杂多样,因此所测得结果对流体作用和矿床成因信息的认识可能会存在一定的偏差,应采取一种更加精密的或精度更高的测试和研究方法。

原位微区示踪技术具有原位、高精度特点,可以对特定矿物进行定点测试,因此受到国内外地质学者的青睐。虽然对砂岩铀矿该方面研究报道较少,但是在其他类型的金属矿床中有一定的应用;主要集中在原位微区的S、Pb、C、Sr、O、Li、B等同位素方面。例如,通过原位微区分析Mexico EI Chichon火山岩斜长石Sr同位素组成,发现长英质岩浆与基性岩浆有混染作用的特征(Davidson and Tepley, 1997); Tepley et al.(2000), Gagnevint et al.(2005), 以及 Kobayashi et al.(2004)的研究也有相似的结论;利用LA-MC-ICP-MS技术对南非Bushveld岩体中的斜长石和硫化物矿物进行原位Pb同位素示踪,认为富Th的流体对硫化物进行了改造作用(Mathez and Waight, 2003);对英格兰北部晚石炭世长石石英砂岩中的碎屑钾长石进行Pb同位素示踪,确定了两组不同组成钾长石的风化剥蚀花岗岩源岩(Tyrrell et al., 2006);对北秦岭铜峪铜矿床中的长石进行fs-LA-MC-ICP-MS铅同位素原位微区分析表明,赋矿火山岩具有地幔-下地壳混合铅特征,矿床形成于与早古生代商丹洋壳向北俯冲作用有关的岛弧环境(熊潇等,2016);对大营砂岩型铀矿中的黄铁矿进行原位微区Pb测试,利用Pb同位素异常判定黄铁矿的形成期次(张效瑞,2022)等等。

由于砂岩铀矿中普遍含有钙质胶结砂岩,矿石中的碳酸盐胶结物主要是方解石,其碳酸盐C-O同位素是示踪矿床形成和成因的重要线索。但其形成时代有成矿期,也有成岩期和成矿期后。因

此,如果采用的测试样品是全岩或挑选的混合矿物则所得结果难于区分是哪个阶段地质作用的特点,存在数据是否合适的争议,从而影响对矿床特征和成因的认识,这一现状亟待改变。而如果利用原位微区的测试方法,则可以有针对性地各个不同时期和类型的碳酸盐胶结物或方解石进行测试(庞康,2018),这样有了准确、可信和高精度的地球化学数据后才能正确认识矿床的形成过程及其成因。本文在充分进行野外调研和了解地质背景的前提下,将原位微区稳定同位素示踪技术运用到砂岩型铀矿,分析碳酸盐化的碳质来源及铀矿成因特征,弥补了该方面研究的不足,是一次有益的探索和尝试。

2 地质背景

近10年来,在鄂尔多斯盆地北部相继发现了大营铀矿、纳岭沟铀矿、东胜铀矿等超大型-特大型铀矿床,构成了鄂尔多斯盆地北部著名的砂岩型铀矿田区,近年来在塔然高勒地区也发现了大型铀矿(俞初安等,2020)。该铀矿区整体上位于盆地北-东北部边缘,矿床呈北西西向延伸,从西向东依次为大营铀矿、杭锦旗(纳岭沟)铀矿、东胜铀矿(图1)。

盆地东胜-杭锦旗铀矿区位于鄂尔多斯北部-东北部,处于伊盟隆起区。矿区出露下侏罗统延安组(J_{2y}),中侏罗统直罗组(J_{2z})、安定组(J_{2a}),白垩系等地层(图2)。在中侏罗统直罗组沉积时期受到燕山运动的影响,盆地北部总体呈现出北西较高而南东较低的古地形,盆地开始整体上隆以及伊陕单斜构造发生一定程度的掀斜作用,这些变化均有利于铀矿化的构造活化、层间氧化作用的发生,并且这一构造也决定了中侏罗世晚期地下水的径流方向基本与直罗组辫状河道沉积砂体的发育方向保持一致,形成了沿河道砂体畅通完整、力度较强的古地下水“补-径-排”古水动力条件,这些构造作用均有利于层间氧化带砂岩型铀矿的形成(张天福等,2020)。通过ETM遥感图像的解译发现在东胜-杭锦旗-大营的巨型成矿带南部泊江海子地区存在区域性断裂构造断裂,该断裂被命名为泊江海子断裂(刘德长等,2007),该断裂为底部上古生界还原性气体的上升提供了通道,同时也有利于盆地北部地下水的渗流排泄,使层间氧化作用持续进

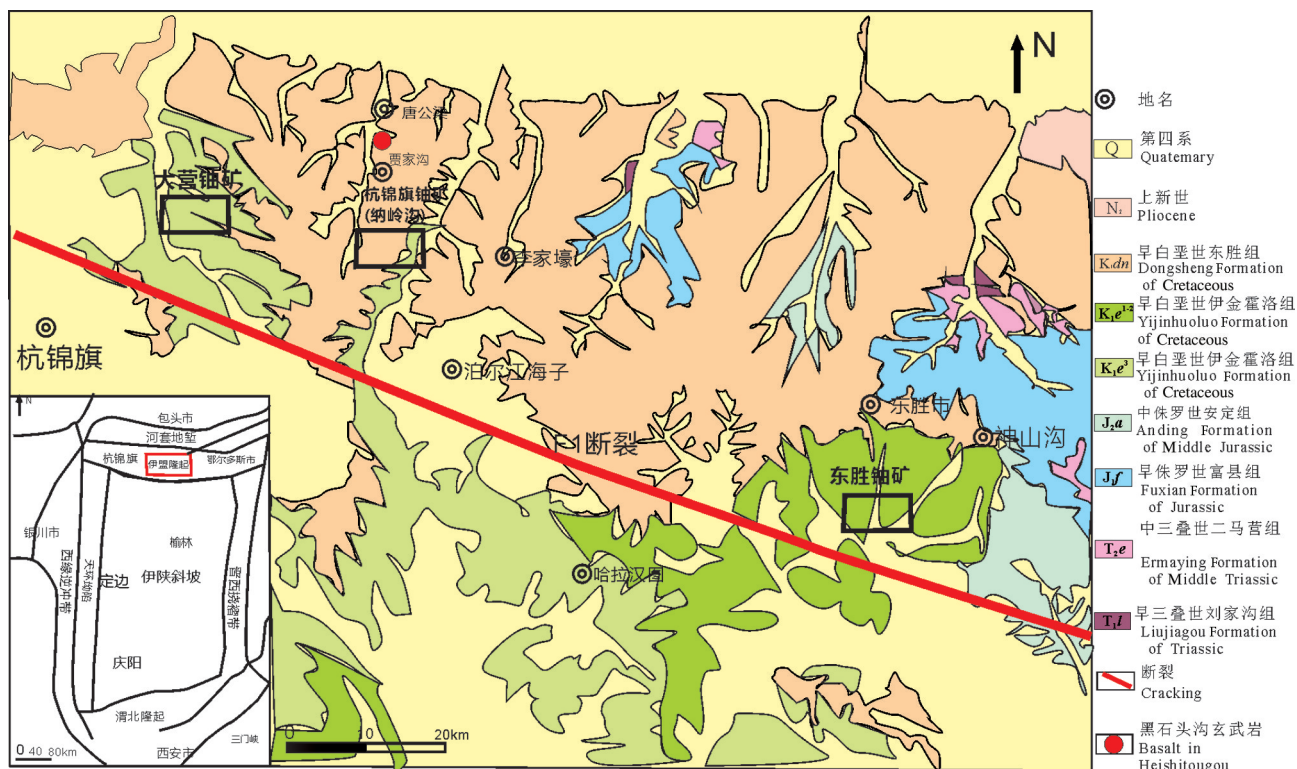


图1 鄂尔多斯盆地北部东胜—纳岭沟—大营铀成矿带地质简图(据吴柏林等,2014,略改)

Fig.1 Geologic map of uranium deposits in the Dongsheng-Hangjinqi-Daying metallogenic belt in North of Ordos Basin(after Wu Bolin et al., 2014)

行。研究表明,铀矿化主要赋存于直罗组下段,属于层间氧化带型铀矿,其受到层间氧化带前锋线控制,位于灰色砂岩与灰绿色砂岩过渡部位,形态为板状或舌状;编录钻井岩心发现,矿层岩心多见有明显的后生蚀变现象,如黄铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化等。鉴于上述认识,本次课题将与铀富集伴生的碳酸盐化现象作为研究对象展开研究。

针对鄂尔多斯盆地北部铀矿区的上述蚀变现象,前人曾做过一些同位素的成因示踪工作。如后生蚀变的S稳定同位素表明,微生物作用特征明显,且与上古生界煤系源岩的有机S源关系密切。延安组顶部大规模白色化砂岩的高岭石H、O同位素表明其成因与低温热液作用有关等。盆地北部铀矿床早期为层间氧化带型铀矿,晚期受到天然气的还原作用和低温热液作用成为现今的绿色蚀变带控矿;油气还原作用除了形成砂岩的绿色蚀变带外,在成矿作用中主要起到保矿作用,并称这一模式为“叠合成矿模式”(吴柏林等,2006;向伟东等,2006;李子颖等,2007)。在该区紧邻绿色化带之下

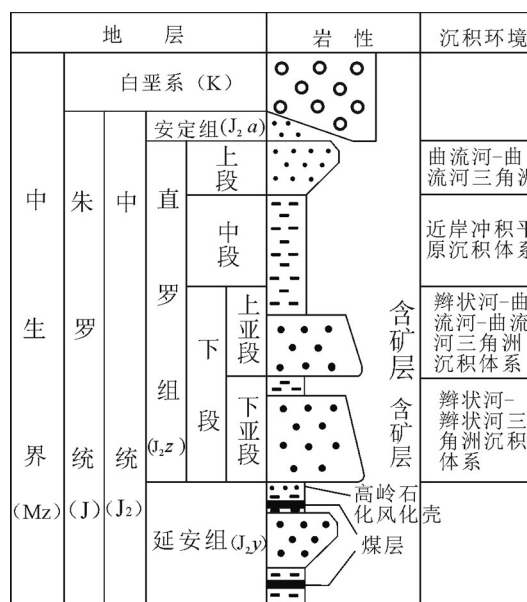


图2 鄂尔多斯盆地北部砂岩铀矿容矿层地层简图
Fig.2 Stratigraphic histogram of Northern Ordos Basin

还存在砂岩白色化现象,认为是耗散天然气还原白色砂岩的结果,称之为“砂岩漂白现象”(马艳萍等,

2007; Fu et al., 2007; 刘池洋等, 2008; 吴柏林等, 2014)。认为盆地中北部上古生界天然气自晚白垩世以来向东北、北部方向大规模耗散, 累计散失量已超过原始资源量的1/3(冯乔等, 2006); 在盆地北部乌兰格尔古隆起分布的大量白垩系油苗就是其散失的直接结果, 它们为成熟度较高的煤型气所形成的凝析油, 来自该区南部上古生界煤系地层(马艳萍等, 2007)。从时空分布特点看, 东胜铀矿区已完全被该天然气耗散所到达和围绕。东胜矿床后期铀的进一步叠加富集及保矿与该区天然气大规模耗散作用环境有关(吴柏林等, 2014, 2016)。

本次工作则从原位微区碳氧同位素的角度, 对盆地北部天然气大规模耗散作用与研究区的碳酸盐化形成关系密切的认识提供了新的数据证据和认识。

3 矿区碳酸盐化及其期次的识别

鄂尔多斯盆地北部铀矿区砂岩碳酸盐化现象十分发育, 在放射性测井过程中局部发现砂岩碳酸盐化与铀含量呈正相关的关系, 说明砂岩碳酸盐化钙质胶结形成过程中流体有铀的带入, 即围岩中分散的铀聚集到钙质砂岩中, 盆地流体对砂岩型铀矿的形成起着重要的作用(刘建明等, 1997; 朱西养等, 2005; 杨晓勇等, 2007)。笔者通过对东胜以东神山沟地区直罗组的实地踏勘, 从野外产状角度看, 发现有2种明显碳酸盐化现象: 一种为碳酸盐化的砂岩透镜状集合体, 在含矿层直罗组中呈不连续透镜状产出, 找矿单位称之为“钙质层”, 质硬, 遇酸有明显的起泡反应, 与围岩产状明显不同, 为成岩后的产物, 进行地层原位实地挖掘, 发现其又有两种产出形态, 一种为前述的质地较硬的透镜状碳酸盐化钙质砂岩, 镜下观察多为亮晶方解石胶结; 另一种在地层裂隙或空洞中往往见纯度较高的方解石晶体, 形似硅化木, 俗称“钙化木”(图3), 由于其分布于含矿层不连续透镜状碳酸盐化砂岩中, 且在其中呈脉体或晶体集合体的形式产出, 明显是成岩作用之后的产物(包括成矿期和成矿期后), 为后期气态流体充填作用成因(吴柏林等, 2015)。通过扫描电镜能谱分析和镜下观察, 碳酸盐胶结碎屑颗粒, 呈基底式胶结, 钙化木中碳酸盐几乎全部是方解石, 多为粒径较大的亮晶方解石; 钙化砂岩可观察到

泥晶方解石和亮晶方解石共存的现象(图4)。另一种为原生沉积成因、即成岩期的碳酸盐, 在野外可见其在地层中呈连续的薄层状分布, 厚度从十几厘米到几十厘米不等(图3j), 这种成因的碳酸盐与本区的铀矿化成因关系不大, 是本次研究测试必须排除或去除的对象。因此, 由于形成的地质环境不同, 后生蚀变碳酸盐化砂岩与沉积形成的碳酸盐岩具有明显不同的产出形态、地球化学特征等。从实验室显微镜下观察的角度来看, 发现原生沉积碳酸盐化砂岩多为微晶—泥晶方解石, 颜色较深, 纯度较低; 后生碳酸盐化砂岩多为亮晶方解石, 纯度高, 粒径大。

因此, 区分3个阶段(成岩期、成矿期、成矿期后)的碳酸盐胶结物的方法是: 一是从野外产状观察, 如果“钙质砂岩”呈层状并与地层产状分布一致, 基本为成岩期的产物; 二是呈不连续地透镜状分布于矿化层中, 为成矿期或成矿期后的产物。采取第二种成矿期或成矿期后碳酸盐化砂岩对其进行进一步观察研究, 依据高倍显微镜薄片观察和电子探针观察, 与铀矿物共存或有穿插包含关系或呈亮晶方解石形态的认为是矿化期产物; 呈脉状穿层或非矿石产在晶洞中的方解石为成矿期后的产物。这些特点是本文取样及其性质判别的主要依据。在此基础上进行碳酸盐原位微区的C—O同位素测试。

笔者野外实地踏勘, 选取神山沟直罗组野外露头透镜状碳酸盐化砂岩、“钙化木”方解石晶体集合体, 以及在钻井岩芯编录过程中采集的大营—纳岭沟碳酸盐化高矿化砂岩, 对其进行原位微区碳、氧同位素分析测试, 在微观层面上(微米级)进一步更加系统和精细地判定成矿流体特征以及成矿期次与环境。前两者为矿化后期的碳酸盐化, 后者为矿化期次的碳酸盐化。总之, 均是成岩期后的样品, 同时结合电子探针微观图像区分成矿期和成矿期后的情况。由于砂岩铀矿的形成是后生作用的产物, 因此, 这些样品的研究结果能正确反映铀矿化流体或成矿作用的成因特征。样品采样登记表见表1。

4 铀矿物特征

成矿期碳酸盐化与铀矿化关系密切。研究表明, 成矿期碳酸盐总是与铀矿化和黄铁矿化密切共生(图5), 并有一定的穿插关系; 这为成矿期碳酸盐化的原位微区碳氧同位素测试提供了条件。本次

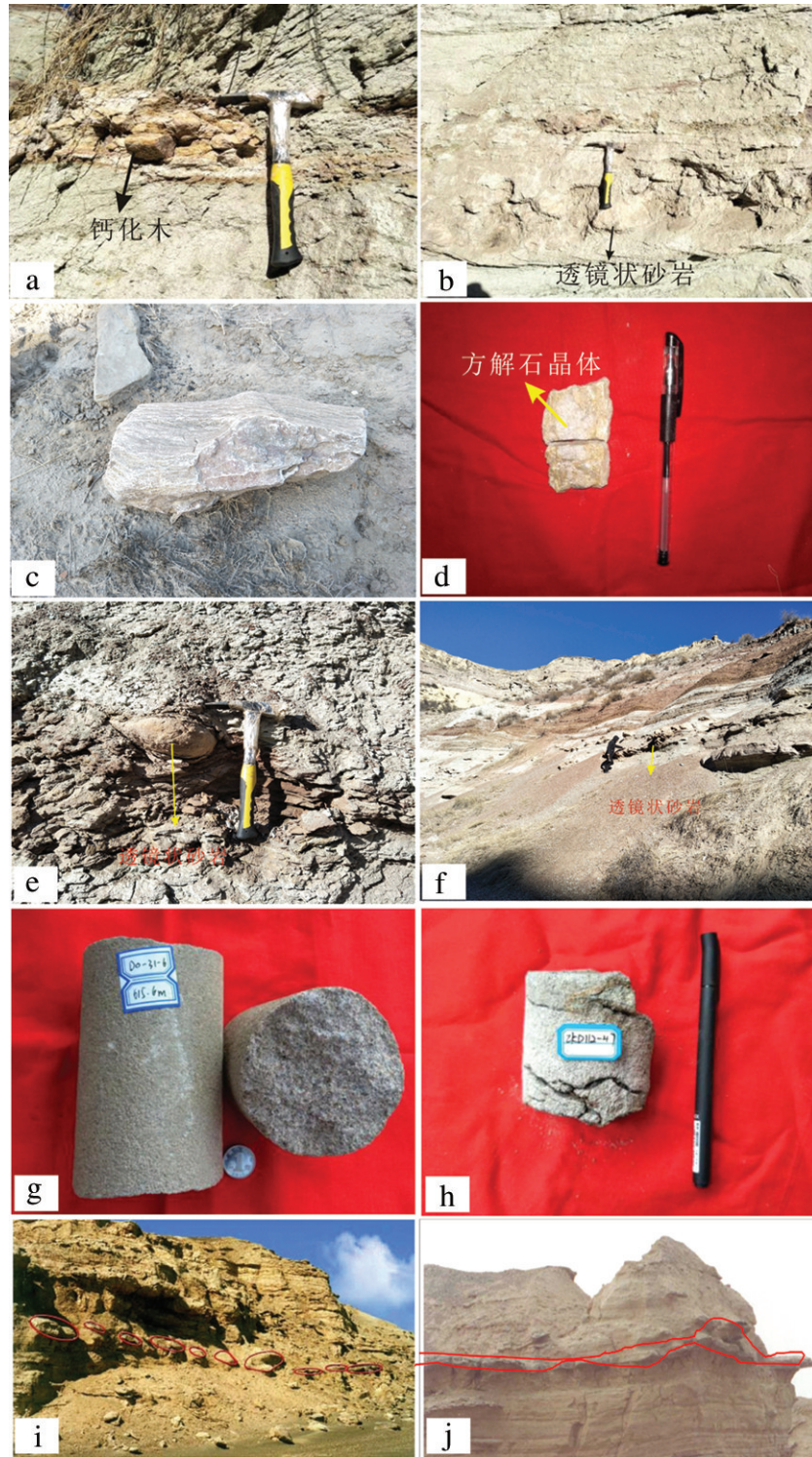


图3 盆地北部碳酸盐化现象

a, c—"钙化木"状砂岩; b, e, f, i—碳酸盐化或钙质砂岩透镜体; d—"钙化木"中的方解石晶体; g, h—钻井岩芯矿化钙质胶结砂岩; j—呈层状产出的成岩期钙质胶结砂岩

Fig.3 Carbonation in the northern part of the Ordos Basin

a, c—"Calcified wood" sandstone; b, e, f, i—Carbonated or calcareous sandstone lens; d—Calcite crystals in "calcified wood"; g, h—Mineralized calcareous cemented sandstone in the drilling core; j—Layered diagenetic calcareous cemented sandstone produced in layers

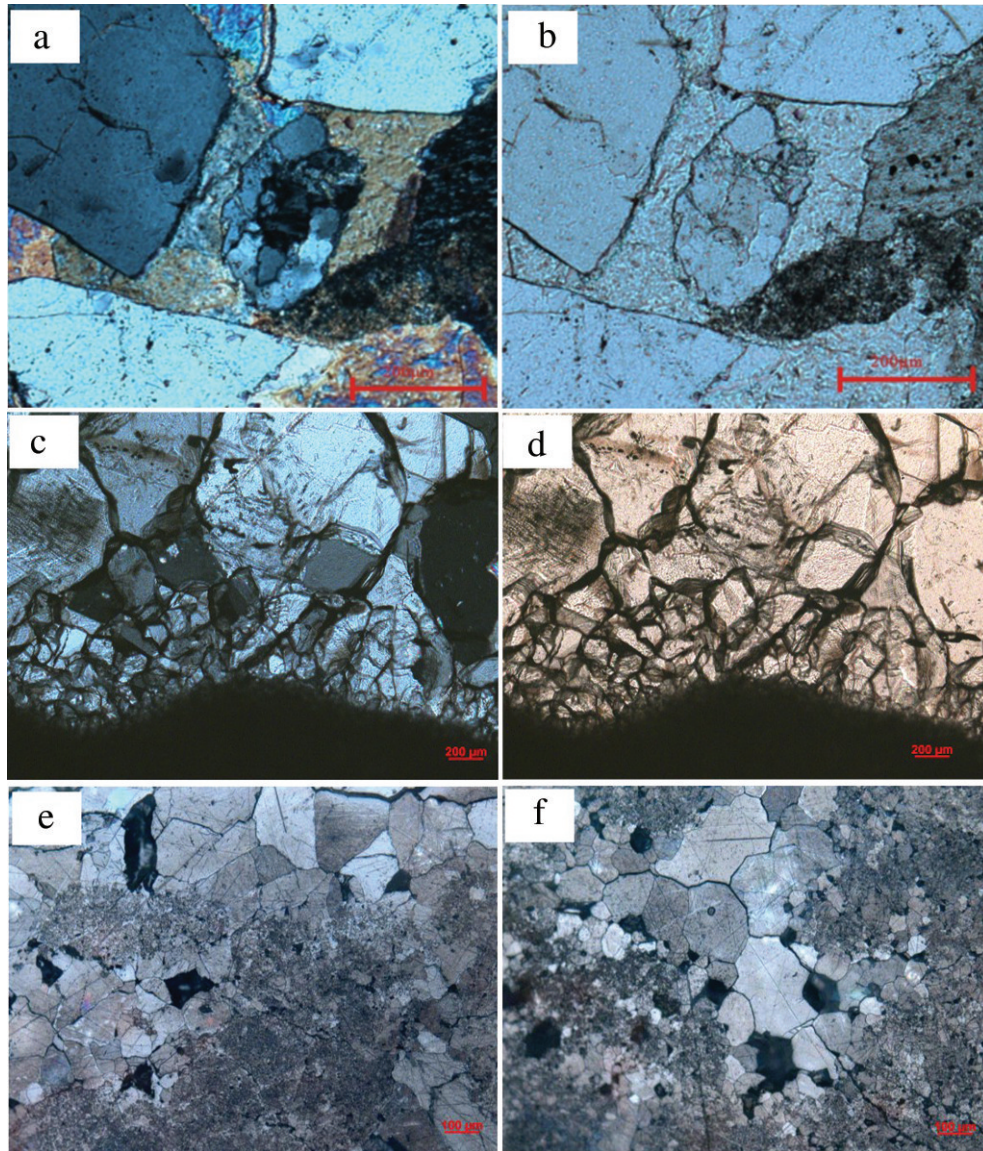


图4 碳酸盐化镜下特征

a—方解石基底式胶结并充填孔隙,交代碎屑(+); b—a的单偏光; c—“钙化木”状砂岩中方解石晶体(+); d—c的单偏光; e、f—钙化砂岩中泥晶方解石和亮晶方解石共生(-)

Fig.4 Photomicrographs showing the characteristics of carbonation

a—Calcite-based cementation and filling pores,cement the debris(+); b—Single polarized light of a; c—Calcite crystals in "calcified wood" sandstone (+); d—Single polarized light of c; e, f—Symbiosis of micrite calcite and sprite calcite in calcified sandstone(-)

铀矿物和碳酸盐化测试对象的选定在西安地质调查中心电子探针实验室进行。电子探针测试分析条件:探针的电子束加速电压 15 kV, 电流强度 10 nA, 斑束直径 2 μm 。因电子探针无法检测出羧基、有机质、碳氢等元素的含量,所以水和有机质无法检出,致使检测总含量小于 100%。

本次运用电子探针对方解石成分进行分析,铀矿物粒径在 20~200 μm ,测试点数为 24 个。经分析

认为大营铀矿、杭锦旗铀矿中铀矿物主要以沥青铀矿和铀石为主,同时含少量的含钛、铁的铀矿物(表 2),这也与前人的研究成果相一致(杨晓勇等, 2009; 苗爱生等, 2010; 马晔等, 2013; 寸小妮等, 2016)。铀石中 UO_2 含量在 63.49%~69.82%, SiO_2 一般在 20% 以上; 沥青铀矿 SiO_2 含量一般小于 20%, 平均在 15% 以内, UO_2 含量明显高于铀石; 含钛的铀矿物中 TiO_2 含量较高, 认为是含钛、铁的矿物在还原

表1 大营—纳岭沟地区铀矿物C-O同位素测试样品清单
Table 1 The sample list of uranium mineral C-O isotopes in Daying-Nalingou area

序号	样号	岩性	位置	地区
1	ZKD208-23-2	浅灰绿色中砂岩	ZKD208-23-2井 626 m	大营
2	ZKD112-47	灰白色粗砂岩	ZKD112-47井 581 m	大营
3	ZKD96-31-1	浅灰绿色粗砂岩	ZKD96-31-1井 669 m	大营
4	D031-6	棕红色中砂岩	D031-6井 575 m	大营
5	ZKN16-56-1	灰白色中砂岩	ZKN16-56-1井 413 m	纳岭沟
6	GHM-1	钙化木		神山沟
7	GHM-2	钙化木		神山沟
8	GHM-3	钙化木		神山沟

作用下形成铀矿物。成因铀矿物学认为,含钛铀矿形成温度比铀石、沥青铀矿高,在120~300℃、350~450℃下均可形成;结合盆地直罗组地层中天然气逸散充注事件,说明铀矿物的形成与中低温热液作用有

关,矿区铀矿化的形成经历了热的作用。

5 SHRIMP 仪器测试

本次微区原位碳氧同位素测试在澳大利亚国立大学地球科学学院进行,使用微区原位稳定同位素示踪领域国际领先的SHRIMP SI同位素测试仪进行测试,仪器主要由样品室、磁场、电场、质谱仪四部分组成(图6)。SHRIMP具有高分辨率、高灵敏度、高精度、微量以及原位分析的特点,不需要经过复杂的化学分离过程,一方面消除了复杂的化学分离过程中样品被交叉污染的可能性,另一方面消除了实验流程中有毒有害气体对环境的污染(周丽芹等,2012;邹洁琼,2018;叶丽娟等,2019)。

SHRIMP(Sensitive High Resolution Ion Microprobe),即高分辨率离子探针,是能够对地质样品进行原位分析的质谱仪,其原理是用氧(O)或铯(Cs)作为离子源对样品10~30 μm进行束斑轰击,样品的碎片和激发的二次离子被传送到质谱仪进行分析,根据不同质谱比将离子分离(李秋立等,2013)。

表2 铀矿物的电子探针成分分析结果(%)
Table2 Uranium mineral probe date (%)

序号	样品号	矿物名称	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Y ₂ O ₃	TiO ₂	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	FeO	PbO	UO ₂	Yb ₂ O ₃	MnO	Total
1	ZKD96-31-3	沥青铀矿	16.75	0.04	0.04	1.25	0.11	0.00	2.06	0.00	0.15	1.43	1.09	0.09	0.09	69.56	0.00	0.11	92.78
2	ZKD96-31-4-1	沥青铀矿	16.17	0.03	0.27	1.35	0.13	0.11	2.61	0.22	0.52	1.00	2.59	0.23	0.04	67.91	0.09	0.20	93.52
3	ZKD96-31-4-2	沥青铀矿	19.40	0.09	0.16	1.45	0.09	0.17	1.67	0.00	0.37	1.32	2.02	0.10	0.05	66.97	0.00	0.16	94.00
4	ZKD96-31-5-1	沥青铀矿	17.16	0.03	0.06	1.18	0.29	0.00	1.66	0.13	0.00	0.85	1.53	0.33	0.16	69.82	0.10	0.18	93.55
5	ZKD96-31-5-2	沥青铀矿	17.64	0.03	0.06	1.30	0.47	0.06	1.17	0.00	0.00	0.66	1.22	0.36	0.00	69.48	0.08	0.15	92.67
6	ZKD96-31-9-1	铀石	22.57	0.00	0.30	1.72	0.11	0.12	1.60	0.16	0.31	0.94	2.28	0.14	0.00	61.15	0.00	0.09	91.51
7	ZKD96-31-9-2	铀石	20.70	0.05	0.16	1.61	0.15	0.07	1.99	0.41	0.15	1.21	2.44	0.13	0.07	65.20	0.00	0.01	94.43
8	ZKD112-47-18-1	铀石	20.87	0.06	0.06	1.69	0.56	0.09	1.18	0.56	0.08	1.24	3.55	1.60	0.30	64.12	0.00	0	96.02
9	ZKD112-47-18-2	沥青铀矿	19.40	0.00	0.09	1.41	0.58	0.08	0.99	0.27	0.31	0.51	3.53	1.69	0.19	66.67	0.00	0	95.97
10	ZKD112-47-18-3	铀石	21.48	0.00	0.63	1.74	0.67	0.14	1.47	0.57	0.31	0.95	2.78	1.07	0.03	65.44	0.00	0	97.33
11	ZKD112-47-18-4	铀石	22.33	0.03	0.49	1.82	0.59	0.19	1.53	0.60	0.15	1.06	2.81	0.73	0.09	65.35	0.03	0	97.85
12	ZKD112-47-18-5	铀石	20.66	0.00	0.17	1.71	0.71	0.15	0.96	0.51	0.20	1.19	2.87	1.13	0.04	66.15	0.00	0	96.50
13	ZKD112-47-18-6	铀石	21.41	0.03	0.47	1.78	0.58	0.19	1.43	0.41	0.07	0.85	3.18	1.07	0.15	65.66	0.10	0.03	97.46
14	ZKD112-47-18-7	铀石	21.93	0.05	0.78	1.87	0.57	0.24	1.56	0.73	0.00	0.62	2.78	0.92	0.20	65.56	0.00	0	97.84
15	ZKD112-47-18-8	铀石	23.29	0.07	0.55	1.68	0.58	0.09	0.91	0.56	0.20	0.66	3.39	1.78	0.12	62.66	0.00	0.01	96.58
16	ZKD112-47-18-9	铀石	21.18	0.02	0.37	1.77	0.66	0.12	1.47	0.59	0.15	0.35	3.39	0.22	0.06	66.94	0.00	0	97.40
17	ZKD112-47-9	沥青铀矿	17.69	0.05	0.04	1.58	0.38	0.12	1.45	0.52	0.30	0.39	1.73	0.01	0.00	69.19	0.05	0.20	93.69
18	ZKD112-47-16-1	沥青铀矿	19.13	0.01	0.02	1.47	0.27	0.08	1.26	0.63	0.54	0.31	2.05	0.49	0.08	64.55	0.09	0.14	91.12
19	ZKD112-47-16-2	沥青铀矿	19.55	0.02	0.04	1.69	0.31	0.10	1.67	0.63	0.00	0.47	2.00	0.54	0.00	65.02	0.03	0.05	92.12
20	ZKD112-47-20	铀石	20.12	0.03	0.10	1.68	0.52	0.16	1.31	0.96	0.07	0.27	0.00	0.01	0.00	63.49	0.06	0.05	88.89
21	ZKN16-56-1	含钛铀矿物	15.08	0.01	0.07	0.69	0.43	0.08	1.74	1.58	2.09	0.54	1.23	0.70	0.00	61.07	0.01	0.05	85.36
22	ZKN16-56-2	沥青铀矿	15.40	0.12	0.03	0.71	0.40	0.12	1.82	1.85	0.20	0.19	1.17	0.30	0.00	68.47	0.00	0	90.81
23	ZKN16-56-3	沥青铀矿	15.48	0.07	0.25	0.77	0.48	0.09	2.01	1.85	0.03	0.31	0.00	0.07	0.00	65.42	0.15	0	87.00
24	ZKN16-56-4	沥青铀矿	15.54	0.13	0.34	0.78	0.45	0.06	1.83	1.70	0.08	0.39	1.58	0.56	0.00	65.23	0.00	0	88.75

注:测试单位为西安地质调查中心电子探针实验室。

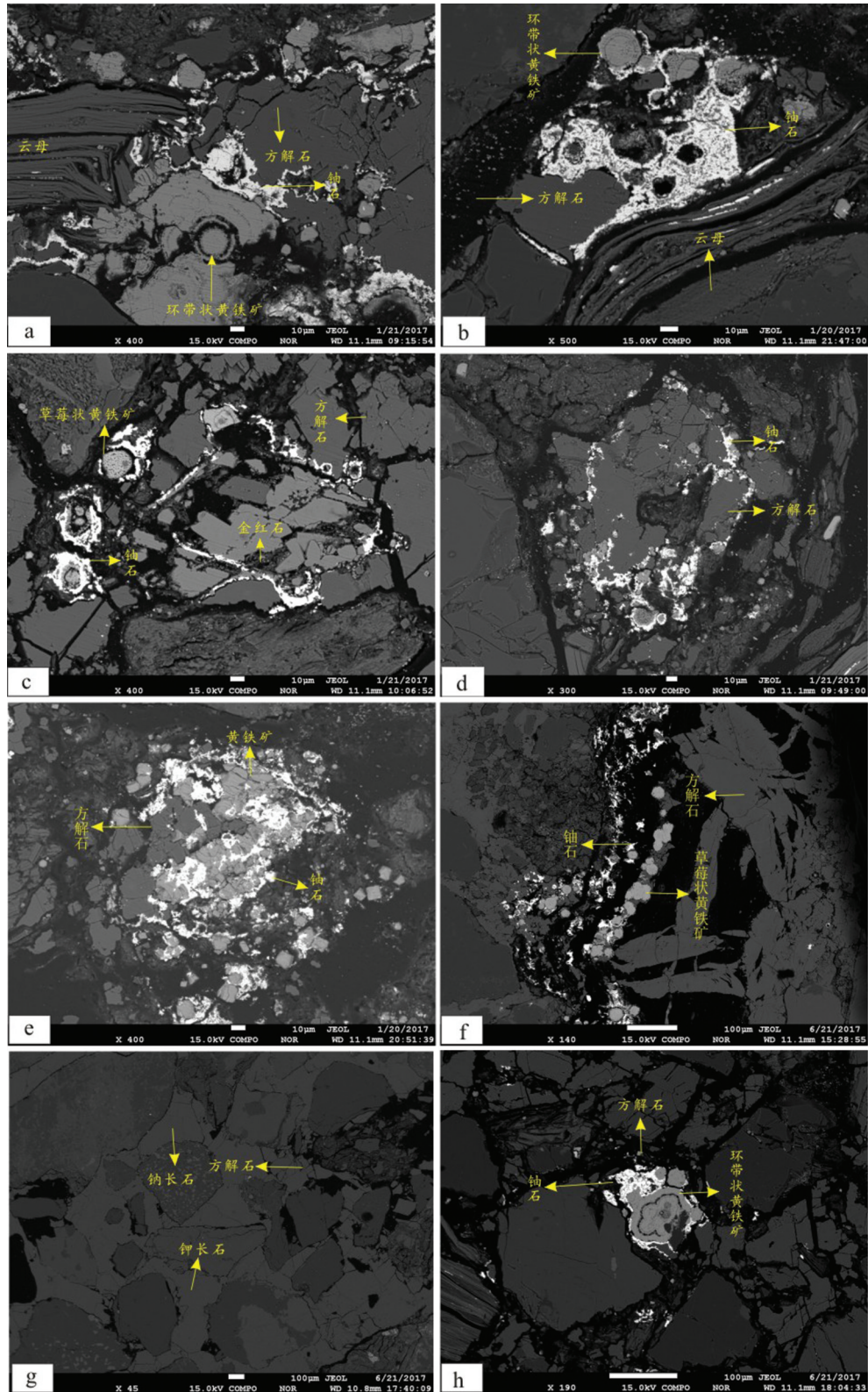


图5 黄铁矿与铀矿物BSE图像

a、b、c、f、h—铀石与方解石、黄铁矿共生; d、e—铀石与方解石共生; g—方解石和长石共生

Fig.5 BSE images of pyrite and uranium minerals

a, b, c, f, h—Mineral assemblages of coffinite, pyrite and calcite; d, e—Mineral assemblages of coffinite and calcite; g—Mineral assemblages of calcite and feldspar

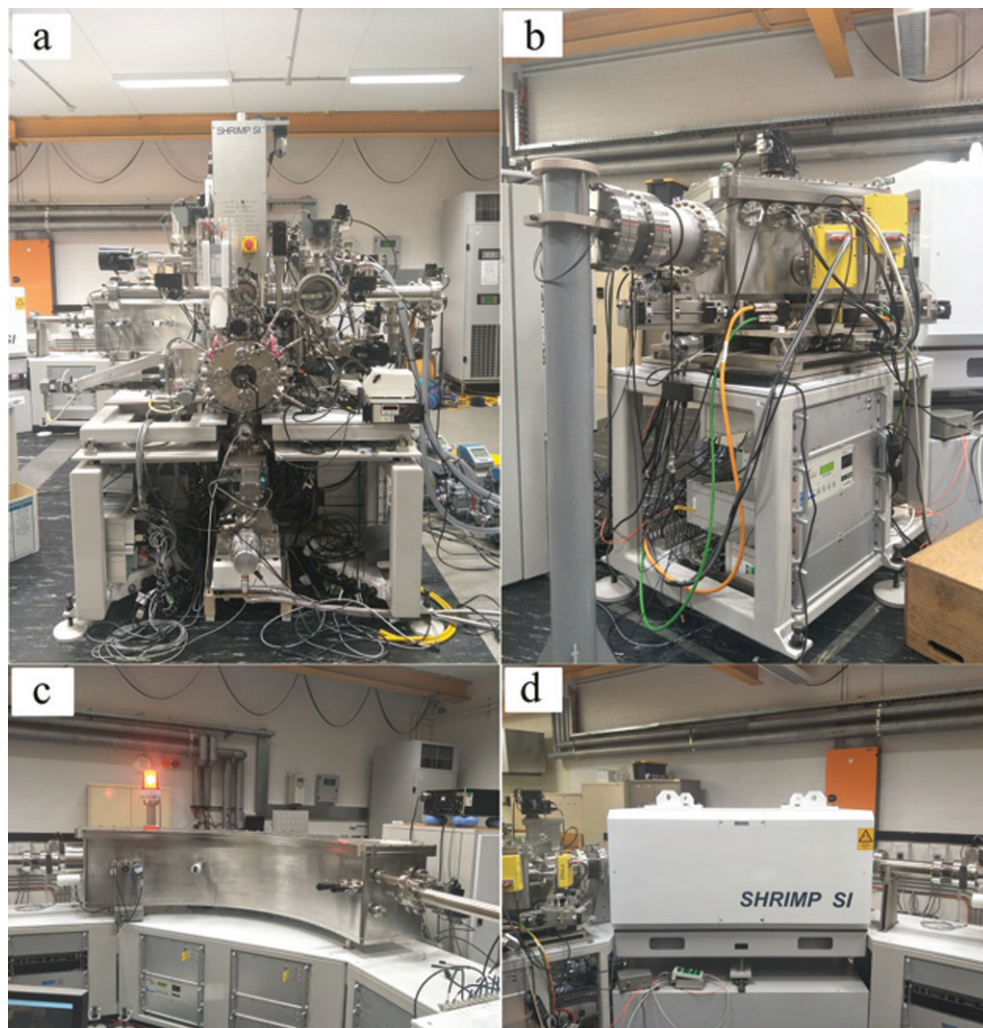


图6 SHRIMP SI各组成部分

a—样品室; b—质谱仪; c—磁场; d—电场

Fig.6 The component of SHRIMP SI

a—Sample room; b—Mass spectrograph; c—Magnetic field;d—Electric field

实验样品的选择与处理:以实验室制备的纯净方解石作为标样,编号UWC-3、NBS-19,测试精度0.08‰;对“钙化木”探针片进行扫描电镜能谱分析,所测结果与预想一致,是高纯度方解石,无碎屑成分(图7)。在进行SHRIMP实验前,需要对探针片进行前处理:显微镜全视域照相、切割、打磨、黏贴、注胶、制靶、抛光、拍照等(宋彪等,2002),总计制靶2个(图8),样品靶测试前需要对待测方解石和方解石标准样品进行显微照相并拍摄扫描电镜照片。拍照前需用无水乙醇擦洗抛光好的样品靶正面,清除抛光砂和其他污染物。根据黏贴样品时画好的示意图依次对3组样品进行拍照,找到所测区域并

标注编号,将其投在SHRIMP SI测试软件上,以便上机测试时方便找到待测点。

6 SHRIMP碳氧同位素特征及示踪

6.1 碳氧同位素特征

本次实验没有采集连续分布呈板状特征的成岩期碳酸盐化样品,采集的样品均呈透镜状分布于含矿层中,其产状与原生沉积成因的薄层板状碳酸盐化砂岩明显不同,是成岩期后流体充注的结果,是成矿期或成矿期后的钙质胶结砂岩。因此,认为测试的方解石均是成矿期及成矿期后的产物。钙化木状砂岩样品产于含矿层中,但本身非矿石,且

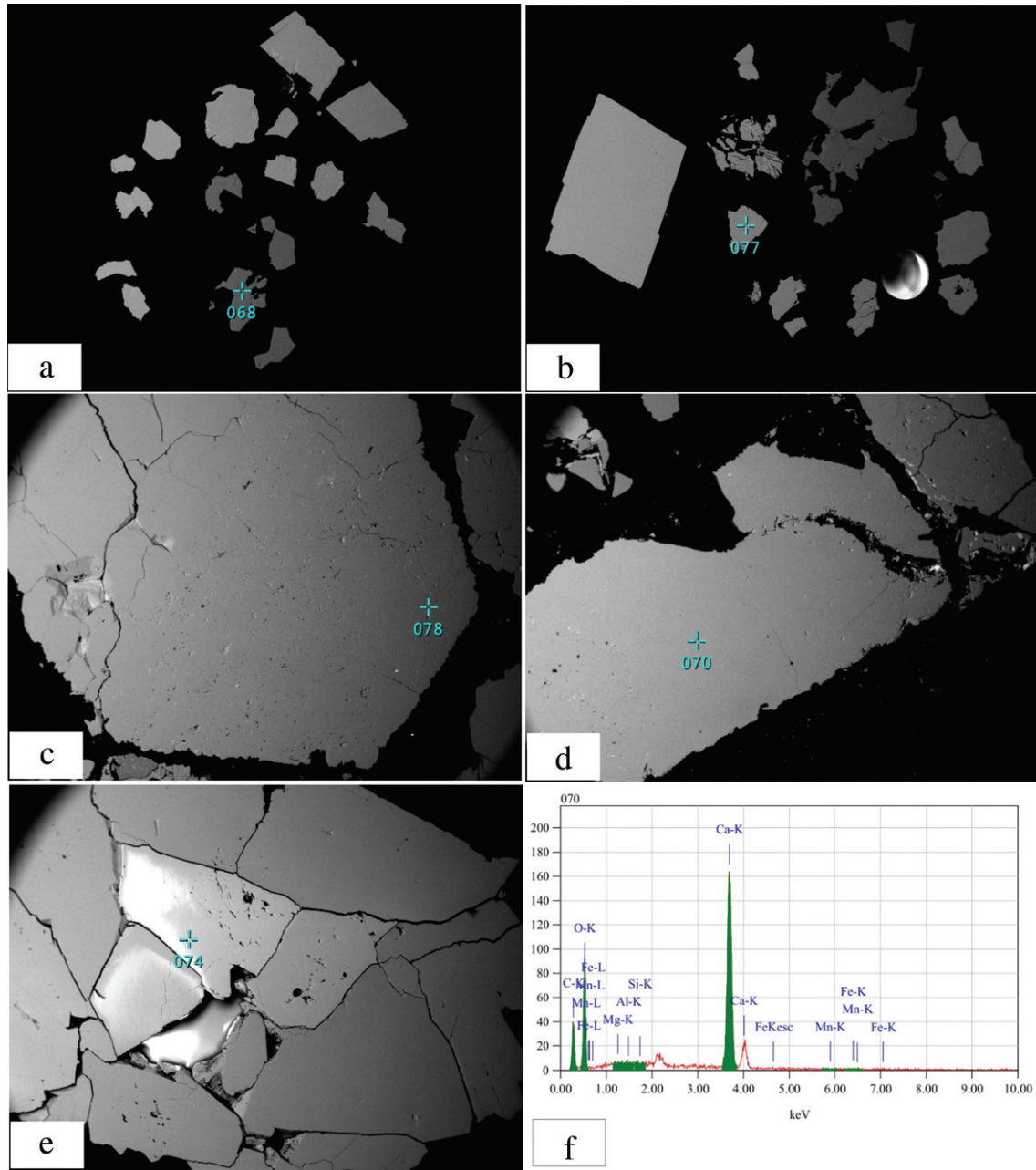


图7 “钙化木”扫描电镜图像及能谱分析结果

a,b—方解石标样;c,d,e—钙化木扫描电镜图像;f—“钙化木”扫描电镜能谱分析结果

Fig.7 SEM images of "calcified wood" and analysis result of energy spectrum

a,b—Calcite standard sample; c,d,e—SEM images of calcified wood; f—Energy spectrum of SEM in the "Calcified wood"

其中的方解石晶体均是充填于晶洞中或沿裂隙呈脉状分布,明显是天然气流体作用的产物,故而认为钙化木状碳酸盐化是成矿期后的产物。在进行SHRIMP微区原位C-O同位素测试之前,通过电子探针背散射图像观察,根据铀矿物与方解石的接触关系,即方解石与铀矿物共生、两者相互穿插接触,

认为其与铀矿物是同一时期形成,当只含有方解石时认为其是成矿期后形成的。

基于以上认识,对上述3种产状的样品进行微区原位C-O同位素测试,总计测试了34个碳数据、34个氧数据,通过电子探针观察方解石与铀矿物的接触关系,挑选出成矿期方解石16个,成矿期后的

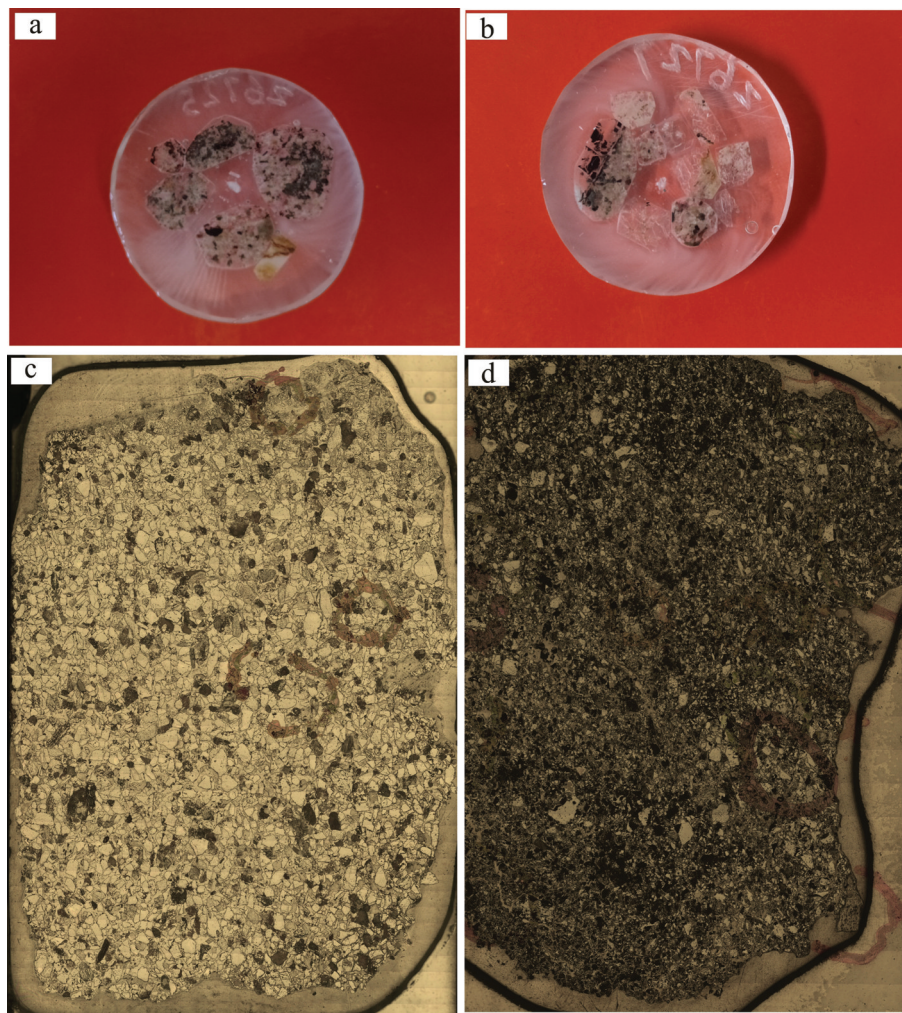


图8 方解石样品靶及探针片显微镜全视域照片

a,b—样品靶;c,d—探针片全视域照片

Fig.8 Sample target of calcite and microscope full view photo of probe sheet

a,b—Sample target; c,d—Microscope full view photo

钙化木8个,成矿期后钙质砂岩中方解石10个,氧同位素所测结果以PDB为标准,SMOW与PDB之间转换关系如下:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=1.03091\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+30.91;$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}=0.97002\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-29.99$$

样品号、测试数据及不同期次方解石电子探针背散射照片及镜下剥蚀坑位置如下(表3,图9,图10)所示。

上述微区原位测试数据结果的分布情况(图11):成矿期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 的极值分别是 -14.17‰ 和 0.86‰ ,平均值为 -6.93‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 极值分别是 18.43‰ 和 14.06‰ ,平均值为 16.02‰ ;成矿期的钙化木 $\delta^{13}\text{C}$ 极值是 -11.02‰ 和 -0.24‰ ,平均值是

-4.07‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 的极值分别为 18.35‰ 和 20.3‰ ,平均值为 19.07‰ ;成矿期后的钙质砂岩 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-12.11\text{‰} \sim -1.18\text{‰}$,平均值 -5.41‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 在 $14.05\text{‰} \sim 21.66\text{‰}$,平均值 18.22‰ 。

从碳氧同位素分布特征可以看出:成矿期方解石、成矿期后方解石、成矿期后的“钙化木”碳同位素组成相似,表明三者形成过程中具有同一流体作用特征, $\delta^{13}\text{C}$ 较为宽泛,小于大气降水的 $\delta^{13}\text{C}$ (一般在 -7‰),高于有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ ($-18\text{‰} \sim -33\text{‰}$; Mack et al.,1991),说明是大气降水和有机质共同污染的结果。有机质的作用是本区砂岩铀矿形成过程中的一大特征。

前人通过对后生流体包裹体均一温度测试发

表3 盆地北部不同期次方解石SHRIMP碳、氧同位素数据

Table3 SHRIMP carbon and oxygen isotope data of calcites in different periods in Northern Ordos basin						
序号	样品号	成矿期次	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	校正 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
1	ZKD96-31		-4.63	-12.11	18.43	-4.84~6.49
2	ZKD96-31		-10.51	-15.88	14.55	-8.27~2.61
3	ZKD96-31		-14.17	-15.17	15.28	-7.99~3.34
4	ZKD96-31		-4.74	-12.46	18.07	-5.2~6.13
5	ZKD96-31		-4.73	-16.35	14.06	-9.21~2.12
6	ZKD96-31		-7.00	-15.22	15.23	-8.04~3.29
7	ZKD96-31		-7.72	-14.97	15.48	-7.79~3.54
8	ZKD96-31	成	-9.60	-15.56	14.88	-8.42~2.94
9	ZKD112-47	矿	0.86	-14.30	16.17	-7.10~4.23
10	ZKD112-47	期	-2.06	-15.26	15.19	-8.08~3.25
11	ZKD112-47		-13.67	-15.46	14.98	-8.29~3.04
12	ZKD112-47		-10.18	-12.48	18.05	-5.22~6.11
13	ZKD112-47		-3.43	-12.90	17.62	-5.65~5.68
14	ZKD112-47		-7.23	-13.81	16.68	-6.59~4.74
15	ZKD112-47		-1.13	-13.15	17.36	-5.91~5.42
16	ZKD112-47		-9.28	-16.06	14.36	-8.91~2.42
17	ZKD208-23		-11.69	-13.55	16.95	-6.32~5.01
18	ZKD208-23	成	-3.06	-16.36	14.05	-9.22~2.11
19	ZKD208-23	矿	-5.36	-8.98	21.66	-1.61~9.72
20	ZKD208-23	期	-2.68	-11.11	19.46	-3.81~7.52
21	ZKD208-23	后	-5.64	-12.31	18.23	-5.04~6.29
22	D031-6	(钙	-12.11	-12.44	18.09	-5.18~6.15
23	D031-6	质	-9.31	-13.33	17.18	-6.09~5.24
24	D031-6	砂	-1.18	-12.01	18.54	-4.73~6.60
25	D031-6	岩)	-1.43	-11.63	18.93	-4.43~6.99
26	D031-6		-1.67	-11.47	19.09	-4.18~7.15
27	GHM-1	成	-1.38	-11.80	18.75	-4.52~6.81
28	GHM-1	矿	-4.49	-11.66	18.80	-4.47~6.68
29	GHM-1	期	-5.49	-12.06	18.48	-4.76~6.54
30	GHM-2	后	1.98	-11.75	18.80	-4.47~6.68
31	GHM-2	(“钙	-11.02	-10.29	20.30	-2.97~8.36
32	GHM-2	化	-3.61	-10.77	19.81	-3.46~7.87
33	GHM-3	木”)	-4.37	-11.25	19.32	-3.95~7.38
34	GHM-3		-0.24	-12.19	18.35	-4.92~6.41

现,该地区存在两期不同温度的流体活动,第一温度区间在45~60℃,是常温流体,平均53℃,代表了早期古层间氧化带砂岩型铀矿的形成温度;第二温度区间在140~180℃,为低温热液流体,平均160℃,该期流体代表了油气耗散作用下的热液流体活动,是铀叠加富集及保矿过程中的流体;研究区方解石脉天然气包体测温结果表明,上古生界耗散天然气温度范围为90~160℃,与铀石形成于中高温环境的结果相一致,认为是下部具有较高温度的天然气耗散进入直罗组对常温地下水加热,使其温度升高,为混合的“气-水热液”流体提供了低温

的“热源”(吴柏林等,2014,2016)。

O'Neil(1969)提出了用来计算与方解石平衡的流体水同位素组成的分馏方程式,即 $\delta^{18}\text{O}_{\text{cc}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=2.78\times 10^6/T^2-2.89$;方解石按上述两期流体作用的温度:53℃、160℃来计算,方解石氧同位素组成采用本文的测定值,分别计算出与碳酸盐平衡的流体相同位素组成(表1):成矿期方解石的水相流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为-9.21‰~6.49‰,成矿期后方解石的水相流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在-9.22‰~9.72‰,钙化木水相流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围在-4.52‰~6.81‰。成矿期方解石水相流体和成矿期后方解石水相流体

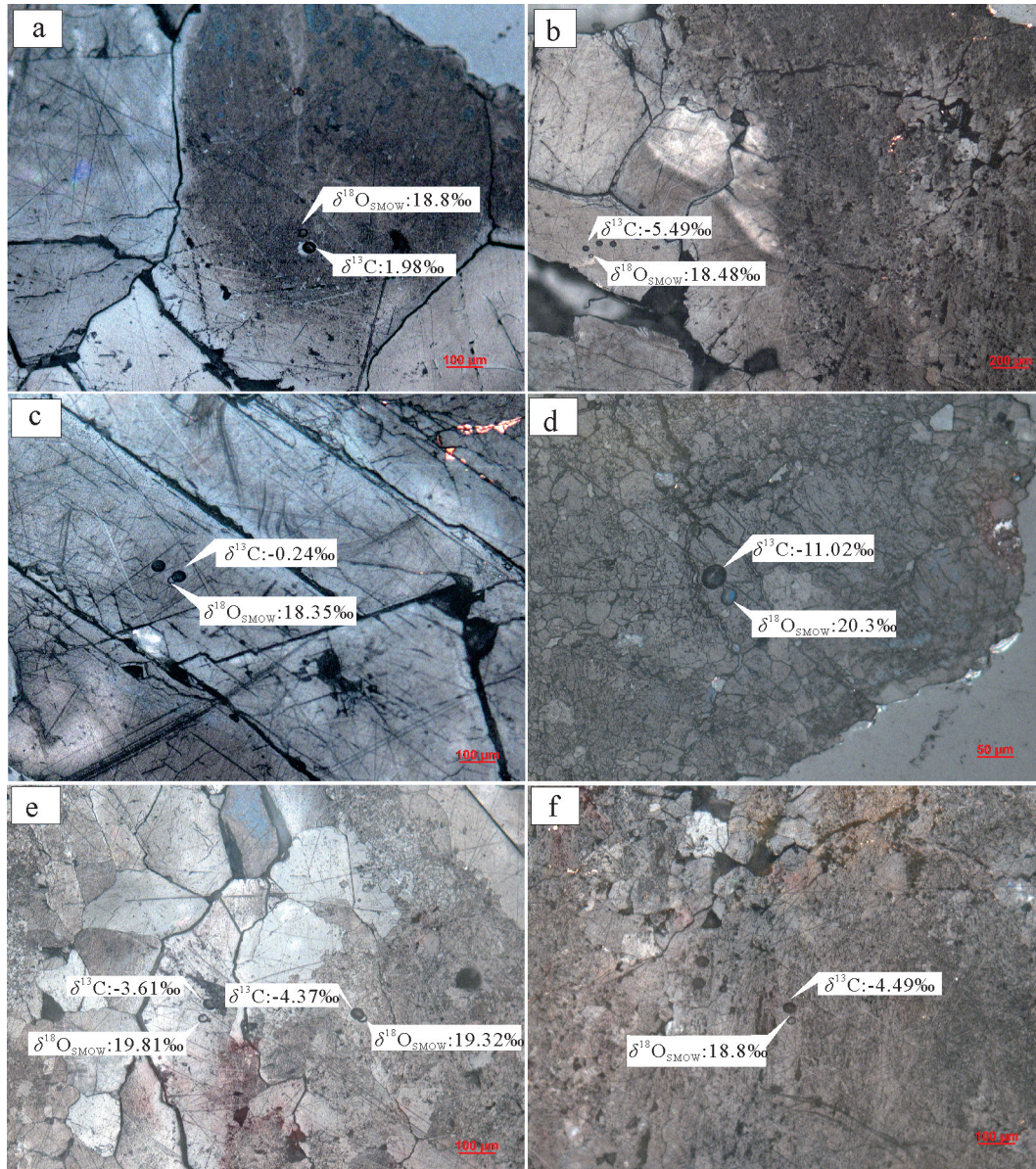


图9 “钙化木”镜下剥蚀坑及 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值

Fig.9 Photomicrographs showing denudation pits and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values of the "calcified wood"

$\delta^{18}\text{O}$ 为较小的负值,与鄂尔多斯地区大气降水平均 -7.40‰ 相似,说明流体作用的水相主要来源于大气降水。

6.2 碳质来源的同位素示踪

从表1中可见,样品C、O同位素的组成特征相对较为一致,C同位素大多为负值,表现出有机碳来源的特征。C同位素组成 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}, \text{VPDB})$ 的极值分别为 -13.67‰ 和 1.98‰ ,平均值为 -5.65‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 的极值为 -16.36‰ 和 -8.98‰ ,平均为 -13.1‰ ,结果均一性较好。将所得数据投在盆地碳酸盐成因判别图

上(图12),图中C、O同位素的组成划分为3个类型: I区为成岩碳酸岩,表示碳酸盐化在沉积成岩过程中形成,其 $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} < 0$; II区为与生物气有关的碳酸盐,强调成因过程中生物作用的参与,其 $\delta^{18}\text{O}$ 范围较宽泛, $\delta^{13}\text{C} > 0$; III区为与有机质有关(生物作用、油气煤参与的流体作用等)的碳酸盐。研究区碳酸盐的C-O同位素组成数据绝大部分都落在了III区中,即为与有机质有关的碳酸盐类型。

研究区所测成矿期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 极小值是 -14.17‰ ,成矿期后方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 的极小值是

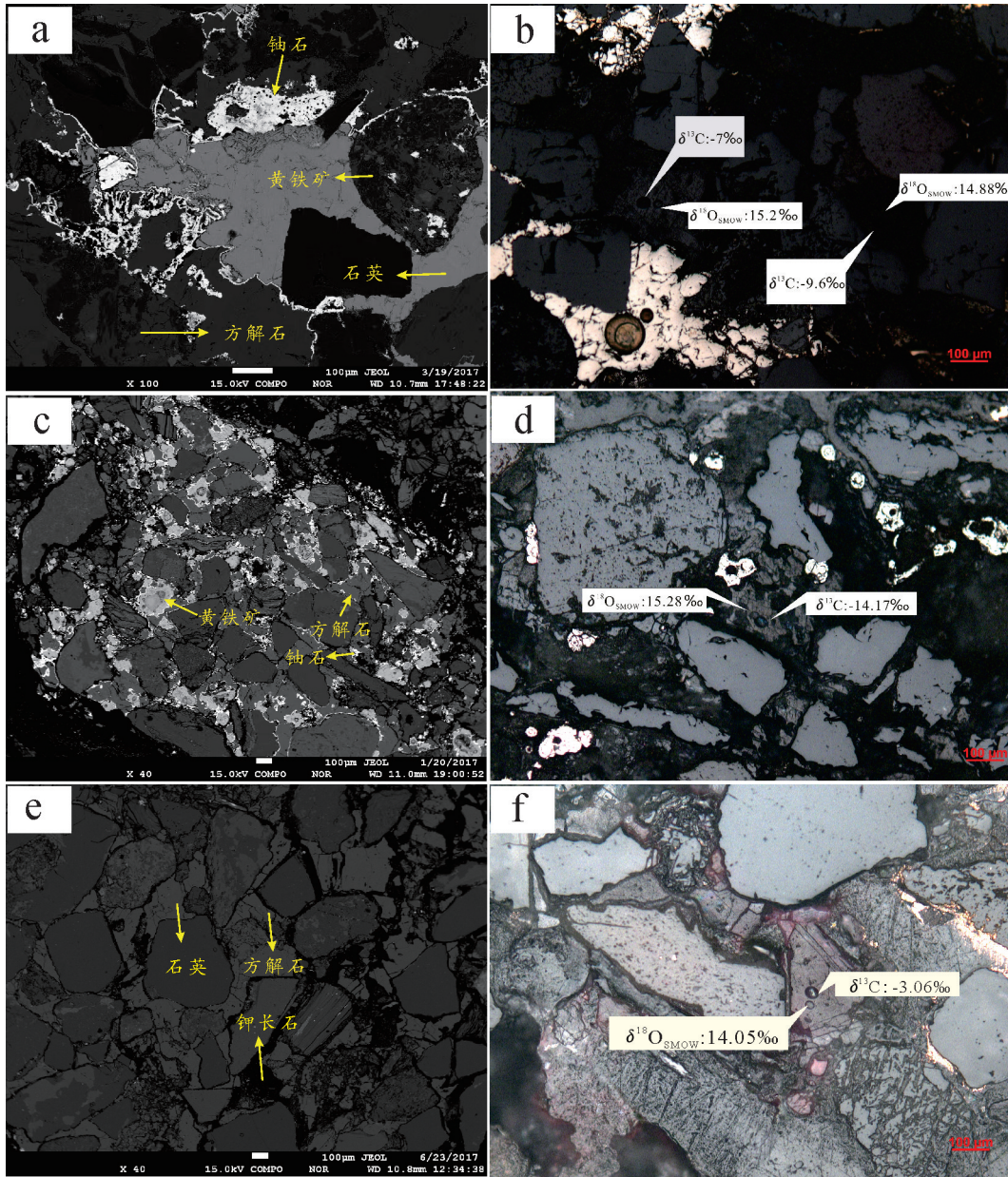


图10 成矿期方解石、成矿期后方解石BSE照片、镜下剥蚀坑及 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 、 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值
 a、c—成矿期方解石BSE照片；b、d—成矿期方解石（反射光）；e—成矿期后方解石BSE照片；f—成矿期后方解石（反射光）
 Fig.10 BSE images and photomicrographs showing denudation pits and $\delta^{18}O_{SMOW}$, $\delta^{13}C_{PDB}$ values of calcite in metallogenic period and after metallogenic period
 a,c—BSE images of calcite in metallogenic period; b,d—Calcite in metallogenic period (reflected light); e—BSE images of calcite after metallogenic period; f—Calcite after metallogenic period (reflected light)

-11.69‰, 钙化木 $\delta^{13}C$ 的极小值是 -11.02‰ (图12)。由于有机质可能是煤、油气或生物的作用等。综合前人对该地区有机质碳同位素组成分析 (吴柏林等, 2014; 罗晶晶, 2018), 成矿期方解石、成矿后方解石、“钙化木”碳同位素与该区白垩系中油砂所测 C 同位素比较接近 (图13), 而该油砂成因又

是上古生界天然气耗散作用后的产物 (吴柏林等, 2014), 说明存在继承关系, 后期由于地质环境的变迁, 同时又存在一定的同位素分馏。

7 结论

(1) 野外调研、高倍显微镜观察、电子探针分析

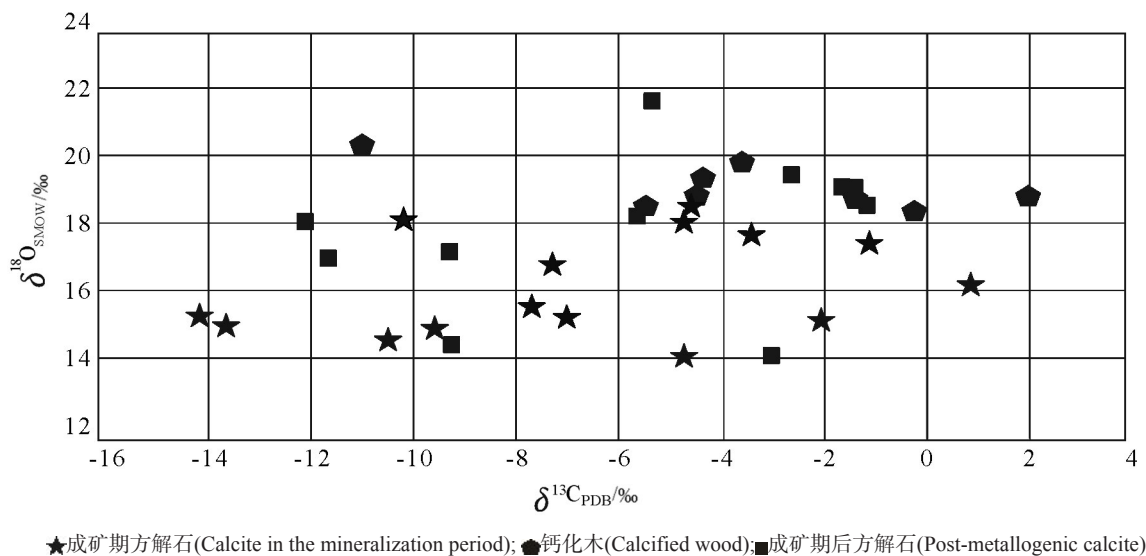


图11 杭锦旗—大营铀矿区原位微区C-O同位素分布
Fig.11 Distribution of C-O isotopes in Hangjinqi-Daying uranium mining area

和原位微区测试相结合,为不同期次碳酸盐胶结物或方解石的识别提供有效手段,这为原位微区碳氧同位素精确示踪矿床成因奠定了基础。首先,从野外产状看,如果“钙质砂岩”呈层状并与地层产状分布一致,则基本为成岩期的产物;如果呈不连续透镜状分布于矿化层中,则为成矿期或成矿期后的产物;其次依据高倍显微镜薄片观察、电子探针图像

分析,认为与铀矿物共存或有穿插包含关系或呈亮晶方解石形态的认为是矿化期产物;呈脉状穿层或非矿石产在晶洞中的方解石为成矿期后的产物。

(2)原位微区碳氧同位素示踪表明铀富集成矿时的流体具有明显的有机质作用特点。成矿期后与成矿期方解石的原位微区碳同位素特征均一致地显示为有机质作用的碳质来源或成因。其中方

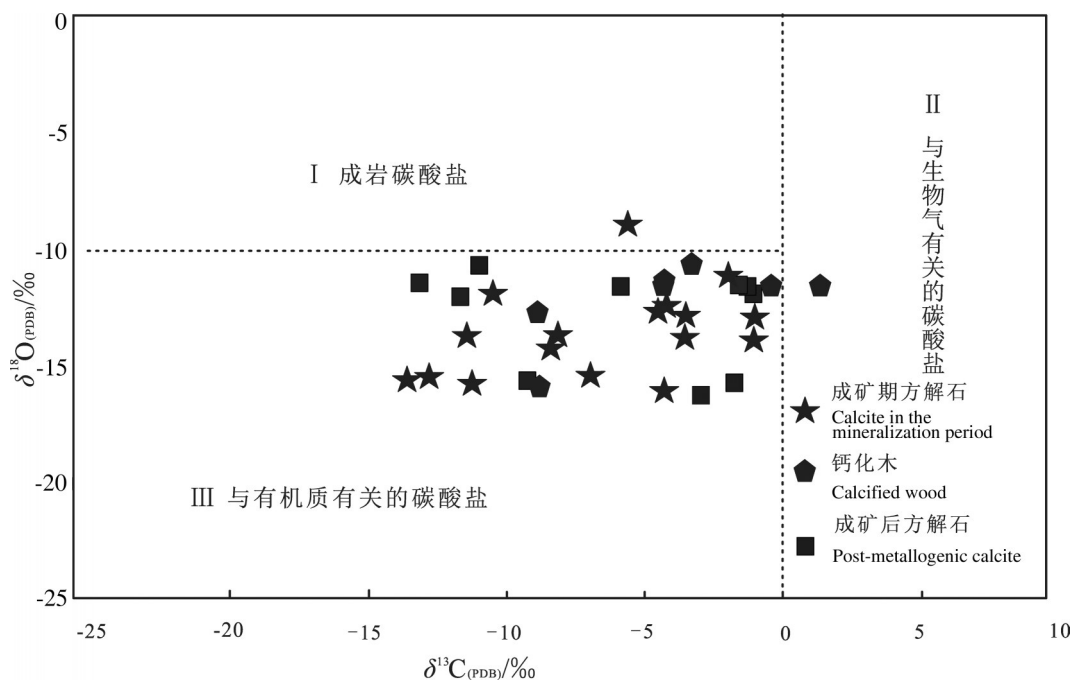


图12 C-O同位素组成图解(底图据刘建明等,1997)
Fig.12 C-O isotope composition diagram(after Liu Jianming et al.,1997)

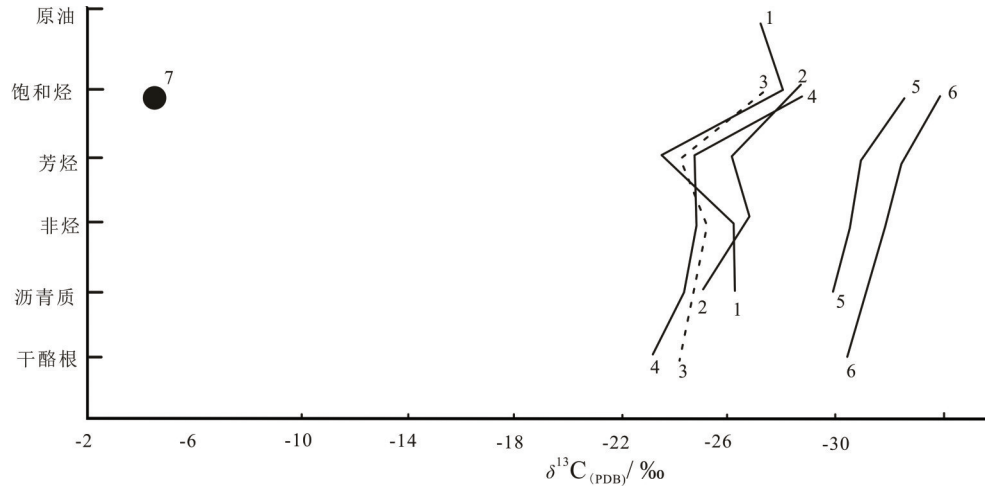


图13 北部白垩系油苗与盆地内各油、气烃源岩及直罗组容矿层中的方解石脉(晶体)中的C同位素特征类比曲线图
(1~6原始数据据张文正,2000;转引自张如良,2004)

1—内蒙古K₁地面油砂;2—图东1井P₁凝析油;3—石炭系煤;4—二叠系泥岩;5—奥陶系泥岩;6—上三叠统延长组;7—研究区成矿期成矿后方解石碳同位素数据平均值

Fig.13 The carbon isotopic type comparative curve diagram of oil seepage and Cretaceous hydrocarbon source rocks in northern Inner Mongolia and calcite vein (crystal) in Zhiluo Formation

1—Inner Mongolia K₁ surface oil sands;2—Tu Dong 1 well P₁ condensate;3—Cretaceous coal;4—Permian mudstone;5—Ordovician mudstone;6—Upper Triassic Yanchang Formation;7—Average carbon isotope data of mineralization period and post-metallogenic calcite in the study area

解石的氧同位素换算成水的氧同位素特征显示流体具有大气水作用的特点。因此,认为盆地上古生界烃源岩产生的天然气向北部运移耗散与地层地下水形成的低温热液流体为这些碳酸盐化的形成提供了主要碳质来源。

(3)本区“钙化木”状碳酸盐化方解石多显示为沿晶洞分布或沿裂隙贯穿,明显为成矿期后天然气沿裂隙充填的结果;结合其原位微区碳氧同位素特征表明,矿区天然气耗散作用从成矿期可一直延至成矿期后,对砂岩铀矿的叠加富集及后期保存起到重要作用。

References

Chan M A, Parry W T, Bowman J R. 2000. Diagenetic hematite and manganese oxides and fault-related fluid flow in Jurassic sandstones, Southeastern Utah[J]. AAPG Bulletin, 84(9): 1281-1310.

Cun Xiaoni, Wu Bailin, Zhang Hongchen, Sun Li, Luo Jingjing, Li Yanqing, Pang Kang, Zhang Qian. 2016. Study on uranium occurrence state of Daying sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 49(2): 198-212 (in Chinese with English abstract).

Davidson J P, Tepley F J III. 1997. Recharge in volcanic systems: Evidence from isotope profiles of phenocrysts[J]. Science, 275:

826-829.

Fan Aiping, Liu Yiqun, Yang Renchao, Feng Qiao, Zhang Fuxin, Han Zuozen. 2007. Study on the diagenesis of sandstone type uranium deposits in Dongsheng area Ordos Basin[J]. Science in China, 37: 166-172 (in Chinese).

Feng Qiao, Qin Yu, Fu Suotang, Liu Yiqun, Zhou Dingwu. 2016. The enrichment of calcite and the genesis of uranium deposits in Dongsheng uranium sandstone[J]. Geological Journal of China Universities, 22(1): 53-59 (in Chinese with English abstract).

Feng Qiao, Zhang Xiaoli, Wang Yunpeng, Fan Aiping, Liu Yiqun. 2006. Characteristics of migration and accumulation of hydrocarbon and its deposit-forming significance in Upper Paleozoic Northern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 748-752 (in Chinese with English abstract).

Fu Binghong, Zheng Guodong, Yoshiki Ninomiya, Wang Chuanyuan, Sun Guoqiang. 2007. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data[J]. Terra Nova, 19(4): 225-231.

Gagnevin D, Daly J S, Waight T E, Morgan D, Poli G. 2005. Pb isotopic zoning of K-felds paramegacrysts determined by Laser Ablation Multi-Collector ICP-MS: Insights into granite petrogenesis[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 69(7): 1899-1915.

Kirkland D W, Denison R E, Rooney M A. 1995. Diagenetic alteration of Permian strata at oil fields of south central Oklahoma, USA [J]. Marine and Petroleum Geology, 12(6): 629-644.

Kobayashi K, Tanaka R, Moriguti T. 2004. Lithium, boron, and lead isotope systematics of glass inclusions in olivines from Hawaiian

- lavas: Evidence for recycled components in the Hawaiian plume[J]. *Chemical Geology*, 212:143–161.
- Li Qiuli, Yang Wei, LIU Yu, Tang Guoqiang, Hao Jialong, Zhang Jianchao, Hu Sen, Zhao Xu Chao, Chen Yali. 2013. Ion microprobe microanalytical techniques and their applications in earth sciences[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(3):310–327 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Xiao Jianxin, Sun Ye, Liu Chiyang, Wang Yi. 2007. Origin of gray–green sandstone in the target layer of sandstone–type uranium deposits in northern Ordos Basin[J]. *Science in China*, 37: 139–146 (in Chinese).
- Liu Chiyang, Ma Yanping, Wu Bailin, Liu Chao. 2008. Weakness and difficulty of petroleum geology study and resource assessment: Hydrocarbon dissipation[J]. *Natural Gas and Oil*, 29(4): 517–526 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dechang, Ye Fawang, Zhang Jiemin. 2007. The discovery of the Bojianghaizi gas–oil ring structure and its important role in uranium mineralization[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 18(1): 69–72 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Liu Jiajun, Gu Xuexiang. 1997. Basin fluids and their related ore deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (4): 341–352 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jingjing, Li Yanqing, Pang Kang, Zhang Wanying, Sun Bin, Cheng Xianghu, Zheng Xin, Hao Xin. 2018. Geochemical characteristics of paleo–interlayer oxidation zone in Daying uranium deposit in Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(5): 280–287 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yanping, Liu Chiyang, Zhao Junfeng, Huang Lei, Yu Lin, Gui Xiaojun, Fang Jianjun, Wang Jianqiang. 2007. The relationship between sandstone bleaching and natural gas escape of Mesozoic in the northeastern Ordos Basin[J]. *Science in China*, 37: 127–138 (in Chinese).
- Ma Ye, Wu Bolin, Liu Yafei, Liu Chiyang, Zhao Zhongping, Wang Haitong, Song Zisheng, Wei Anjun. 2013. Study on uranium occurrence state of sandstone type uranium deposits in HJQ region, Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 46(2): 141–152 (in Chinese with English abstract).
- Mathez E A, Waight T. 2003. Lead isotopic disequilibrium between sulfide and plagioclase in the Bushveld Complex and the chemical evolution of large layered intrusion[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67:1875–1888.
- Miao Aisheng, Lu Qi, Liu Huifang, Xiao Ping. 2010. Electronic microscopy study on the uranium minerals of Dongsheng sandstone type uranium deposit in Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 24(4):785–792(in Chinese with English abstract).
- O'Neil J R. 1969. Oxygen isotope fraction in divalent metal carbonate[J]. *J. Chem. Phys.*, 51.
- Pang Kang. 2018. The Characteristics of In–situ Stable Isotopes and their Geological Significance about Sandstone Uranium Deposits in Northern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Qiao Haiming. 2006. The Organism–organic Matter–fluid Metallogenetic Study on Shihongtan Uranium Deposits in Turpan–Hami Basin Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Quan Jianping, Fan Tailiang, Xu Gaozhong, Li Weihong, Chen Hongbin. 2007. Effects of hydrocarbon migration on sandstone–type uranium mineralization in basins of northern China[J]. *Geology in China*, (3): 470–477(in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26–30(in Chinese with English abstract).
- Sun Li. 2016. Geological Characteristics and Genesis Analysis of Daying Sandstone Type Uranium Deposit in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Sima Xianzhang, Zhu Qiang, Feng Xiaoxi, Chen Yin, Chen Lulu, Liu Xiaoxue. 2016. Carbon and oxygen isotopic composition and uranium mineralization significance of calcite of Zhiluo Formation uranium bearing sandstones in Dongsheng area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(4): 698–706 (in Chinese with English abstract).
- Tepley F J, Davidson J P, Tilling R I. 2000. Magma mixing, recharge and eruption histories recorded in plagioclase phenocrysts from El Chichon volcano, Mexico[J]. *Journal of Petrology*, 41:1397–1411.
- Tyrrell S, Haughton P D W, Daly J S, Kokfelt T F, Gagnevin D. 2006. The use of the common Pb isotope composition of detrital K–feldspar grains as a provenance tool and its application to Upper Carboniferous paleodrainage, northern England[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76: 324–345.
- Wei Anjun. 2014. The Study of Isotopic Tracing for Diagenetic Alteration and Uranium Mineralization of Hydrocarbon Dissipation in the North of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin. 2005. Geology and Mineralization of Sandstone Uranium Deposits in Mesozoic and Cenozoic Basin in Northwest China[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Wu Bailun, Wei Anjun, Hu Liang, Cun Xiaoni, Sun Li, Luo Jingjing, Song Zisheng, Zhang Long, Cheng Xianghu, Zhang Wanying, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong. 2016. The epigenetic alteration stable isotope characteristics of the Dongsheng uranium ore district and their geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(12): 2133–2145(in Chinese with English abstract).
- Wu Bailin, Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Wang Feiyu. 2006. Geochemical behavior of geologic process of natural gas during mineralization of Dongsheng sandstone–type uranium deposit[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 225–232(in Chinese with English abstract).
- Wu Bailun, Wei Anjun, Hu Liang, Song Zisheng, Zhang Benhao, Wang

- Haitong, Wang Dan, Cun Xiaoni, Sun Li, Luo Jingjing. 2014. The hydrocarbon dissipation and its effect of diagenetic and mineralization: Progress, understanding and outlook[J]. Geological Review, 60(6):1199-1211(in Chinese with English abstract).
- Wu Bailin, Zhang Wanying, Song Zisheng, Cun Xiaoni, Sun Li, Luo Jingjing, Li Yanqing, Cheng Xianghu, Sun Bin. 2016. Geological and geochemical characteristics of uranium minerals in the sandstone type uranium deposits in the north of Ordos Basin and their genetic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12):3393-3407(in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Li Tiangang, Fang Xiheng, Chen Xiaolin, Cheng Huahan, Pang Yaqing. 2006. Metallogenic characteristics and model of Dongsheng uranium deposit in Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 22(5): 257-266(in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiao, Zhu Laimin, Yuan Honglin, Gong Hujun, Ding Lele. 2016. In-situ microanalysis of Pb isotopic compositions using fsLA-MC-ICP-MS for the Tongyu copper deposit in the North Qinling orogen and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 61: 2811-2822(in Chinese).
- Yang Xiaoyong, Luo Xiandong, Ling Mingxing. 2007. C-O stable isotopes of carbonate from cements of U-bearing sandstones in the Ordos Basin and their geological significance[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 37(8): 979-985(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Ling Mingxing, Lai Xiaodong, Sun Wei, Liu Chiyang. 2009. Uranium mineral occurrence of sandstone-type uranium deposits in the Dongsheng-Huanglong Region, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 83(8):1167-1177(in Chinese with English abstract).
- Ye Lijuan, Xiao Zhibin, Tu Jiarun, Geng Jianzhen, Zhang Jian, Xu Yawen, Guo Hu, Cui Yurong, Zhang Yongqing. 2019. U-Pb isotopic dating in situ microanalysis of uranium minerals by EPMA and LA-ICPMS[J]. Acta Geoscientia Sinica, 40(3): 479-482(in Chinese with English abstract).
- Yu Reng'an, Sima Xianzhang, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Peng Shenglong. 2020. Discovery of a largesize uranium deposit in northeast Ordos Basin[J]. Geology in China, 47(3): 883-884(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Wu Bailin, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, Hou Huiqun, Sun Li, Cun Xiaoni, Wang Jianqiang. 2016. Provenance analysis of the Zhiluo formation in the sandstone hosted uranium deposits of the northern Ordos Basin and implications for uranium mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3441-3453(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Jin Ruoshi, Yu Reng'an, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Ao Cong, Ma Hailin. 2020. Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos Basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization[J]. Geology in China, 47(2):278-299(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaorui, Wu Bailin, Lei Angui, Yang Songlin, Yao Luhang, Pang Kang, Bao Zhian, Wang Miao, Hao Xin, Liu Mingyi, Li Qi, Lin Zhouyang. 2022. Pb isotope in-situ microzone identification characteristics in metallogenic and non-metallogenic pyrites in sandstone-type uranium deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111300192. (in Chinese with English abstract).
- Zhou Liqin, IanStuart Williams, Liu Jianhui, Ji Zhansheng, Xiao Yuanfu, Liu Dunyi. 2012. Methodology of SHRIMP in-situ O isotopes analysis on conodont[J]. Acta Geologica Sinica, 86(4): 611-618(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyang, Peng Xinjian, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Wang Zhichang, Wang Jinping, Liu Jianhua. 2004. Isotope geochemistry of Shihongtan interlayer oxidized type sandstone uranium deposit[J]. Mineral Deposits, 23(4): 443-451(in Chinese with English abstract).
- Zou Jieqiong. 2018. Analysis of the Oxygen Isotopic Compositons of Coral by Secondary Ion Mass Spectrometry: In Sights into the Potential Origins and their Palaeoclimatic Implications [D]. University of Chinese Academy of Sciences(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 寸小妮,吴柏林,张洪深,孙莉,罗晶晶,李彦青,庞康,张茜. 2016. 鄂尔多斯盆地大营铀矿铀的赋存状态研究[J]. 西北地质, 49(2): 198-212.
- 樊爱萍,柳益群,杨仁超,冯乔,张复新,韩作振. 2007. 鄂尔多斯盆地东胜地区砂岩型铀矿成岩作用研究[J]. 中国科学(D辑), 37(增刊 I):166-172.
- 冯乔,秦宇,付锁堂,柳益群,周鼎武. 2016. 东胜铀矿砂岩中方解石富集及铀矿成因[J]. 高校地质学报, 22(1):53-59.
- 冯乔,张小莉,王云鹏,樊爱萍,柳益群. 2006. 鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 80(5): 748-752.
- 李秋立,杨蔚,刘宇,唐国强,郝佳龙,张建超,胡森,赵旭晃,陈雅丽,储雪蕾,王英,蒋云,张爱铖,徐伟彪,林杨挺,李献华. 2013. 离子探针微区分析技术及其在地球科学中的应用进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(3):310-327.
- 李子颖,方锡珩,陈安平,欧光习,肖建新,孙晔,刘池洋,王毅. 2007. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因和找矿意义[J]. 中国科学(D辑), 37(增刊 I):139-146.
- 刘池洋,马艳萍,吴柏林,刘超. 2008. 油气耗散-油气地质研究和资源评价的弱点和难点[J]. 石油与天然气地质, 29(4):517-526.
- 刘德长,叶发旺,张杰林. 2007. 泊江海子油气环状构造的发现及其对铀成矿的重要作用[J]. 国土资源遥感, 18(1):69-72.
- 刘建明,刘家军,顾雪祥. 1997. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, (4):341-352.

- 罗晶晶, 李艳青, 庞康, 张婉莹, 孙斌, 程相虎, 郑欣, 郝欣. 2018. 鄂尔多斯盆地大营砂岩型铀矿古层间氧化带地球化学特征[J]. 铀矿地质, 34(5):280-287.
- 马艳萍, 刘池洋, 赵俊峰, 黄雷, 喻林, 桂小军, 房建军, 王建强. 2007. 鄂尔多斯盆地东北部中生界漂白砂岩的特征及其与天然气逸散的关系[J]. 中国科学(D辑), 37(增刊 I):127-138.
- 马晔, 吴柏林, 刘亚非, 刘池阳, 赵忠平, 王海桐, 宋子升, 魏安军. 2013. 鄂尔多斯盆地HJQ地区砂岩型铀矿铀赋存状态研究[J]. 西北地质, 46(2):141-152.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 肖平. 2010. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿中铀矿物的电子显微镜研究[J]. 现代地质, 24(4):785-792.
- 庞康. 2018. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿原位微区稳定同位素特征及其地质意义[D]. 西安:西北大学.
- 乔海明. 2006. 新疆吐哈盆地十红滩铀矿床的流体-有机质-生物成矿作用研究[D]. 西北大学.
- 权建平, 樊太亮, 徐高中, 李卫红, 陈宏斌. 2007. 中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀矿成矿作用讨论[J]. 中国地质, (3):470-477.
- 孙莉. 2016. 鄂尔多斯盆地大营砂岩型铀矿地质特征及其成因探讨[D]. 西北大学.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(S1):26-30.
- 汤超, 司马献章, 朱强, 冯晓曦, 陈印, 陈路路, 刘晓雪. 2016. 东胜地区直罗组含铀砂岩中方解石的碳氧同位素组成及铀成矿意义[J]. 高校地质学报, 22(4): 698-706.
- 魏安军. 2014. 鄂尔多斯盆地北部油气耗散成岩蚀变——铀富集效应的稳定同位素示踪研究[D]. 西安:西北大学.
- 吴柏林. 2005 中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D]. 西安:西北大学.
- 吴柏林, 魏安军, 刘池洋, 宋子升, 胡亮, 王丹, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶. 2015. 鄂尔多斯盆地北部延安组白色砂岩形成的稳定同位素示踪及其地质意义[J]. 地学前缘, 22(3): 205-214.
- 吴柏林, 魏安军, 胡亮, 宋子升, 张本浩, 王海桐, 王丹, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶. 2014. 油气耗散作用及其成岩成矿效应:进展、认识与展望[J]. 地质论评, 60(6): 1199-1211.
- 吴柏林, 魏安军, 胡亮, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶, 宋子升, 张龙, 程相虎, 张婉莹, 王建强, 张东东. 2016. 内蒙古东胜铀矿区后生蚀变的稳定同位素特征及其地质意义[J]. 地质通报, 35(12): 2133-2145.
- 吴柏林, 王建强, 刘池阳, 王飞宇. 2006. 东胜砂岩型铀矿形成中天然气地质作用的地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 27(2): 225-232.
- 吴柏林, 张婉莹, 宋子升, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶, 李艳青, 程相虎, 孙斌. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿矿物地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 90(12): 3393-3407.
- 向伟东, 李田港, 方锡珩, 陈晓林, 程华汉, 庞雅庆. 2006. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式[J]. 铀矿地质, 22(5): 257-266.
- 熊潇, 朱赖民, 袁洪林, 弓虎军, 丁乐乐. 2016. 北秦岭铜峪铜矿床铅同位素的 f_{SLA}-MC-ICP-MS 微区原位分析测定及其地质意义[J]. 科学通报, 61(25): 2811-2822.
- 杨晓勇, 罗贤冬, 凌明星. 2007. 鄂尔多斯盆地含铀砂岩碳酸盐胶结物 C-O 同位素研究及地质意义[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8):979-985.
- 杨晓勇, 凌明星, 赖小东, 孙卫, 刘池洋. 2009. 鄂尔多斯盆地东胜—黄龙地区砂岩型铀矿矿物赋存状态研究[J]. 地质学报, 83(8): 1167-1177.
- 叶丽娟, 肖志斌, 涂家润, 耿建珍, 张健, 许雅雯, 郭虎, 崔玉荣, 张永清. LA-ICPMS 与 EPMA 结合测定铀矿物微区原位 U-Pb 年龄[J]. 2019. 地球学报, 40(3): 479-482.
- 俞初安, 司马献章, 金若时, 苗培森, 彭胜龙. 鄂尔多斯盆地东北缘发现大型砂岩型铀矿床[J]. 2020. 中国地质, 47(3): 883-884.
- 张龙, 吴柏林, 刘池洋, 雷开宇, 候惠群, 孙莉, 寸小妮, 王建强. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿直罗组物源分析及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 90(12): 3441-3453.
- 张天福, 张云, 金若时, 俞初安, 孙立新, 程银行, 奥琼, 马海林. 2020. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 47(2): 278-299.
- 张效瑞, 吴柏林, 雷安贵, 杨松林, 姚璐航, 庞康, 包志安, 王苗, 郝欣, 刘明义, 李琪, 林周洋. 2022. 砂岩型铀矿成矿期与非成矿期黄铁矿的原位微区 Pb 同位素识别特征[J/OL]. 岩矿测试:1-16[2022-09-14]. DOI:10.15898/j.cnki.11-2131/td.202111300192.
- 周丽芹, Ian Stuart WILLIAMS, 刘建辉, 纪战胜, 肖渊甫, 刘墩一. 2012. 牙形石 SHRIMP 微区原位氧同位素分析方法[J]. 地质学报, 86(4):611-618.
- 朱西养, 彭新建, 汪云亮, 张成江, 王志畅, 王金平, 刘建华. 2004. 新疆十红滩层间氧化带型砂岩铀矿同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 23(4):443-451.
- 邹洁琼. 2018. 利用二次离子质谱(SIMS)分析珊瑚氧同位素组成及其在古气候研究中的意义[D]. 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所).