

# 塔里木盆地顺托果勒低隆起顺北 4 号走滑断裂带 成岩流体类型及活动特征

宋刚<sup>1</sup>, 李海英<sup>2</sup>, 叶宁<sup>3</sup>, 韩俊<sup>2</sup>, 肖重阳<sup>2</sup>, 鲁子野<sup>3</sup>, 李映涛<sup>4</sup>

1. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100728;

2. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610050;

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

**摘要:**塔里木盆地顺托果勒低隆起顺北 4 号走滑断裂带是该地区重点勘探目标, 中奥陶统碳酸盐岩是主要的含油气层系。断裂活动及伴随断裂活动的断裂流体活动控制了研究区内储层的分布, 因此, 研究断裂流体的活动特征对勘探工作至关重要。针对研究区顺北 4 号断裂带内中奥陶统碳酸盐岩裂缝中的方解石进行了岩石学、原位锶同位素、原位稀土元素和 U-Pb 测年研究。方解石的锶同位素比值为 0.708 498~0.709 177, 方解石稀土元素表现出明显的 Ce 负异常、Eu 正异常和高 Y/Ho 比值。方解石 U-Pb 测年获得的年龄分别为 (433±17) Ma 和 (449±15) Ma。方解石的原位锶同位素和稀土元素特征说明流体充分继承了碳酸盐岩围岩的特征且经历了高温; U-Pb 年龄则说明顺北 4 号断裂带方解石记录的更可能是与阿尔金造山带挤压造山相关的加里东中期 III 幕运动的断裂流体活动。

**关键词:**走滑断裂; 成岩流体; 碳酸盐岩; 地球化学; 顺北地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Types and features of diagenetic fluids in Shunbei No. 4 strike-slip fault zone in Shuntuoguole Low Uplift, Tarim Basin

SONG Gang<sup>1</sup>, LI Haiying<sup>2</sup>, YE Ning<sup>3</sup>, HAN Jun<sup>2</sup>, XIAO Chongyang<sup>2</sup>, LU Ziyue<sup>3</sup>, LI Yingtao<sup>4</sup>

1. China Petroleum and Chemical Corporation (SINOPEC), Beijing 100728, China;

2. Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC Northwest Oilfield Branch Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

**Abstract:** The Shunbei No. 4 strike-slip fault zone is an important exploration target in the Shuntuoguole Low Uplift of Tarim Basin, and the Middle Ordovician carbonate is a major hydrocarbon-bearing stratum. Fault structures and accompanied fluids play a key role for the distribution of carbonate reservoirs, and it is therefore important to study the fluids accompanied with fault evolution. Petrography, in situ Sr isotopic compositions, in situ rare earth elements (REE) and U-Pb dating were carried out to reveal the fluids from which the calcites in fractures precipitated. The calcites in fractures show <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of 0.708 498 - 0.709 177, and the REE patterns of the calcites are characterized by negative Ce anomaly, positive Eu anomaly and high Y/Ho ratios. The calcite samples show U-Pb isochron age of (433±17) Ma and (449±15) Ma, respectively. The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios and REE patterns of the calcites suggest that parent fluids experienced elevated temperature environment and buffered by carbonate host rocks. The U-Pb isochron age implies that the calcites may record the fault-related fluids during the III stage of the Middle Caledonian Movement, which might be associated with the Altyn orogeny.

**Key words:** strike-slip fault; diagenetic fluid; carbonates; geochemistry; Shunbei area; Tarim Basin

顺托果勒低隆起是近 10 年来塔里木盆地油气勘探的热点地区<sup>[1-2]</sup>, 沿着塔中 I 号断裂带下盘从

北西至南东平行展布的一组 NNE 和 NE 向走滑断裂带是区内的重点勘探目标<sup>[3]</sup>。大量地震和钻井

资料证实,这些 NNE 和 NE 向走滑断裂带控制了断控缝洞型储层和油气藏的分布<sup>[4-8]</sup>,研究显示顺北地区 18 条主干走滑断裂带油气地质储量约 17 亿吨油当量<sup>[9]</sup>。奥陶系一间房组和鹰山组碳酸盐岩是工区内主要的含油气层系,走滑断裂带构造破裂增容和断裂流体对储集空间的调整被认为是该类储层主要的形成和演化机制<sup>[10-12]</sup>。因此,除了针对断裂带内储集空间的刻画以外,研究伴随着断裂开启和再活动的流体活动特征也至关重要<sup>[12]</sup>。

断裂流体的来源和活动时间是断裂流体研究的主要内容,明确来源和活动时间后,就能够定性预测流体对储层的改造形式和改造规模<sup>[13-14]</sup>。裂缝充填物(例如方解石、白云石、石英等矿物)记录了亲源流体信息,是研究断裂流体的良好载体<sup>[15-20]</sup>。然而,要查明断裂流体的来源和活动时间面临很多困难:(1)同一条裂缝中的充填物可能记录了多期次的断裂流体活动,常规的全岩地球化学手段空间分辨率很难刻画多期次流体的特征<sup>[21-22]</sup>;(2)沉积盆地缺乏良好的定年矿物,而顺托果勒地区 NNE 和 NE 向走滑断裂带经历了多期构造活动,存在多次再活化<sup>[23-26]</sup>,使得常规手段研究顺北地区断裂流体活动更加困难。

因此,为了克服空间分辨率的问题,本研究针

对顺托果勒地区 4 号断裂带裂缝中的方解石,采用原位微量元素和原位铀同位素来刻画 4 号带中的断裂流体特征,并对该方解石进行了 U-Pb 年龄测定,约束流体活动的时间,最终确定 4 号带中流体活动的类型和机制。

## 1 区域地质背景

顺托果勒低隆位于塔里木盆地中部、塔中 I 号断裂带下盘,北邻沙雅隆起、南接卡塔克隆起,东西向位于阿瓦提拗陷与满加尔拗陷之间,是相对稳定的古构造单元(图 1a)。顺托果勒地区的走滑断裂带经历了复杂的构造演化,以顺北 1 号和 5 号断裂带为界,断裂带的演化具有明显的“东西分区”的特点<sup>[2]</sup>。顺北 4 号带位于顺北 5 号带以东,加里东中期 I 幕(中奥陶世末),由于塔里木板块南缘的古昆仑洋板块向东北方向俯冲,塔里木盆地受到来自南南向被动的挤压应力,在该挤压应力的作用下,顺托果勒地区形成了大量的 NNE 向区域节理<sup>[3,27]</sup>。加里东中期 III 幕(晚奥陶世),塔里木盆地东南缘阿尔金山碰撞造山,顺托果勒地区 NNE 向区域节理发育为左行走滑断裂,顺北 4 号断裂带在这个时期为左行压扭断裂<sup>[2]</sup>。加里东晚期(中晚志留世),塔里木盆地北缘的南天山洋处于扩张

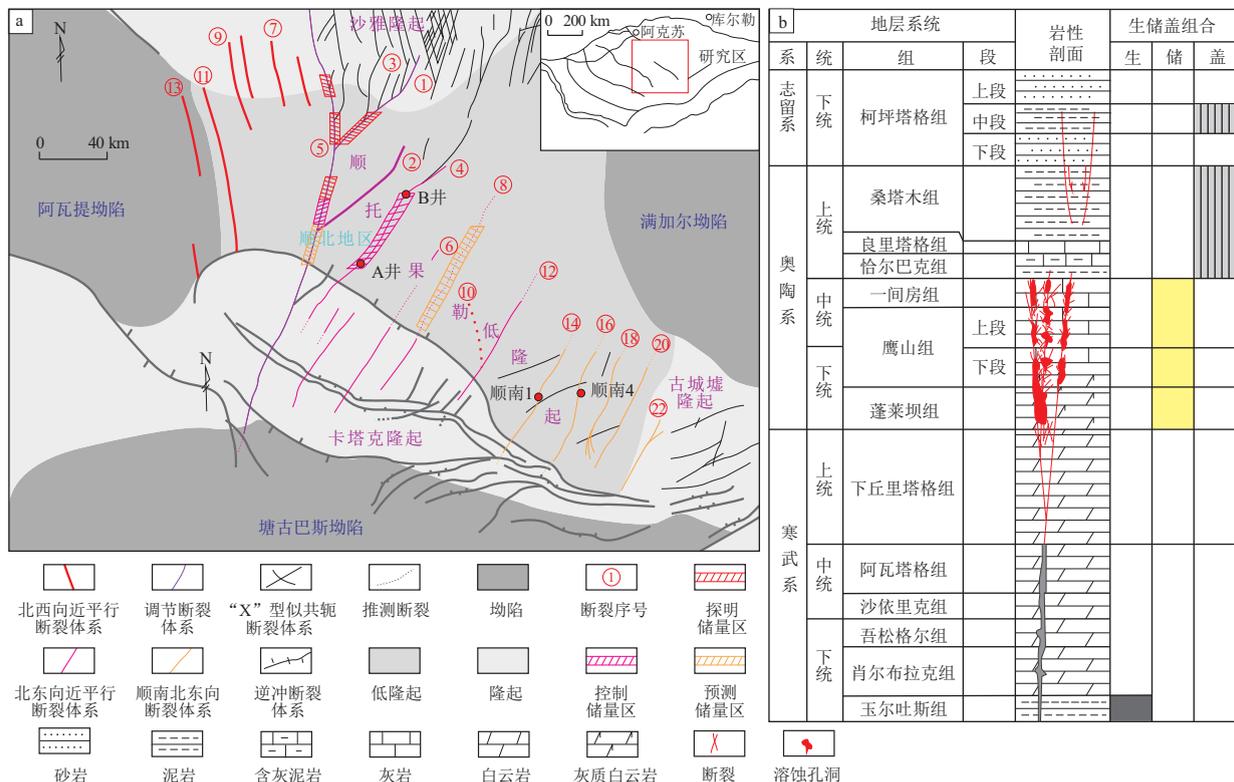


图 1 塔里木盆地顺北油气田构造位置(a)与地层柱状图(b)  
据马永生等<sup>[12]</sup>修改。

Fig.1 Tectonic units (a) and stratigraphic column (b) of Shunbei oil & gas field, Tarim Basin

阶段,这一阶段顺北4号断裂带再次活动,表现为NNE向的左行张扭断裂。海西中晚期(石炭—二叠纪),塔里木盆地南缘进入被动大陆边缘时期<sup>[28]</sup>,这一阶段顺北4号断裂带表现为NNE向的左行张扭断裂。

顺托果勒地区地层发育比较齐全,在寒武—奥陶纪顺托果勒地区位于塔里木盆地碳酸盐台地东侧,主要发育台地边缘、开阔台地相。寒武—奥陶系研究区主要以碳酸盐岩为主(图1b),其中,寒武系岩性以白云岩为主,中—下寒武统发育少量膏岩;奥陶系自下往上可划分为下奥陶统蓬莱坝组(O<sub>1p</sub>),中—下奥陶统鹰山组(O<sub>1-2y</sub>),中奥陶统一间房组(O<sub>2yj</sub>),上奥陶统恰尔巴克组(O<sub>3q</sub>),良里塔格组(O<sub>3l</sub>),桑塔木组(O<sub>3s</sub>),蓬莱坝组和鹰山组下段以白云岩为主,鹰山组上段和一间房组以颗粒含量较高的灰岩为主,恰尔巴克组以紫红色灰质泥岩为主,而良里塔格组和桑塔木组分别以薄层灰岩和泥灰岩为主<sup>[29]</sup>。

顺北油气田已发现的油气藏主要赋存在中下奥陶统鹰山组(O<sub>1-2y</sub>)和中奥陶统一间房组(O<sub>2yj</sub>),其埋深超过7 km,为深层—超深层油气藏,其中顺北4号走滑断裂带是新近增储上产的重要勘探区域,多口单井均已获得重大油气突破。实际勘探情况显示,顺北4号走滑断裂带储层发育情况与该区其他走滑断裂带相似:中—下奥陶统碳酸盐岩表生岩溶作用欠发育,主要发育受大/中型走滑断裂带控制的断控缝洞型储层(图1b,图2)。

## 2 样品和实验方法

本研究针对部署在顺托果勒地区顺北4号走滑断裂带的顺北A井、顺北B井进行了取样分析,

顺北A和顺北B井的样品采集位置分别位于钻井的直井段和水平段(图2),岩心样品中裂缝发育情况较好,可以代表流体沿断裂—裂缝体系对围岩的改造。

岩相学的观察在西南石油大学油气藏地质与开发国家重点实验室完成,其中阴极发光分析在设备RELIOTRON III上进行,其工作电流约为300~500 μA,加速电压为5~8 kV。此外,基于岩相学的观察结果,针对裂缝充填的方解石进行了原位微区Sr同位素比值、原位微量元素以及方解石的U-Pb测年分析。

方解石的原位微区Sr同位素比值测试在武汉上谱分析科技有限责任公司利用激光剥蚀多接收杯电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为Geolas HD(Coherent,德国),MC-ICP-MS为Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific,德国)。激光剥蚀系统使用氦气作为载气。分析采用单点模式,激光束斑为160 μm,激光剥蚀速率为8~15 Hz,激光能量密度固定在约10.0 J/cm<sup>2</sup>。Sr同位素仪器质量分馏校正通过指数法则校正,校正因子利用<sup>88</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=8.375 209估算获得<sup>[30]</sup>。

方解石的原位微量元素实验在西南石油大学碳酸盐岩沉积—成岩地球化学实验室完成。测试所用的激光剥蚀器型号为ESI Newwave193 nm ArF纳秒准分子激光剥蚀系统和Agilent 7800质谱仪,激光束斑为80 μm,频率为10 Hz。测试外标为USGS MACS-3粉末压饼,内标为测试组构中的Ca,微量元素误差小于10%。微量元素计算通过Iolite 4完成,流程见参考文献<sup>[31]</sup>。

方解石U-Pb定年样品的测试前处理过程为

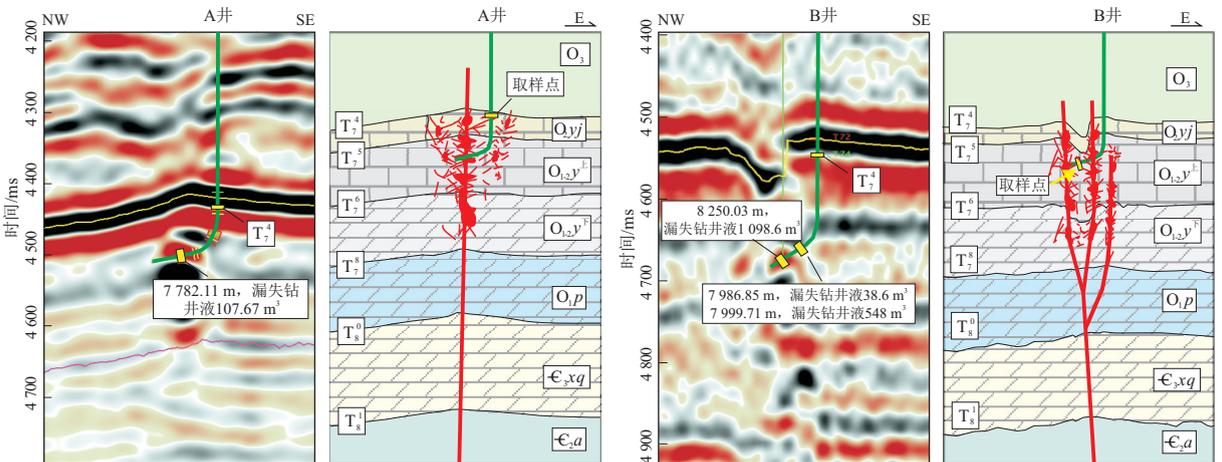


图2 塔里木盆地顺北4号走滑断裂带中—下奥陶统碳酸盐岩储层发育模式示意

Fig.2 Development model of Lower-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Shunbei No. 4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

环氧树脂浇铸制靶(直径为 2.5 cm)、抛光后用 MQ 刷洗样靶正面+超声波清洗 30 min,重复至少两次,晾干或吹干。其后,激光剥蚀铀铅定年分析采用 RESOLUTION 激光剥蚀系统和 Thermo Fisher iCAP RQ 电感耦合等离子质谱仪测定,所用标样来自塔里木盆地阿克苏地区肖尔布拉克组的实验室内部标样 AHX-1D(年龄为  $(238.2 \pm 1.3)$  Ma)进行校准,分析流程与标样分析详见参考文献[32]。

### 3 实验结果及解释

#### 3.1 岩石学特征及成岩共生序列

位于 4 号走滑断裂带围岩区(A 井)和近断裂带内部(B 井)的实际钻井揭示(图 2),在一间房组的泥晶灰岩中裂缝和孔洞较发育,但大多被方解石及少量鞍形白云石、石英所充填。其中,近层面或沿高角度裂缝边缘分布的方解石(C1)为粒状晶

体,晶体大小介于  $50 \sim 200 \mu\text{m}$ (图 3a-d),阴极射线线下具有橙色的发光性(图 3c);高角度裂缝通常被全充填或半充填(图 3d,e),其主要的充填物为方解石(C2),呈块状,其大小几乎都超过  $500 \mu\text{m}$ (图 3f,h),甚至可达数毫米,阴极射线线下具有中等橙黄色的发光性(图 3g,i);此外,部分裂缝中,C1 和 C2 之后的残余空间中还分布有鞍形白云石(SD)以及粒状石英矿物(Qz)(图 3f),分别具有中亮橙红光和不发光的阴极发光性(图 3g)。孔洞中充填的方解石(VC)呈块状,晶体尺寸大于  $500 \mu\text{m}$ 。

从岩心中可见上述裂缝均被顺层缝合线切割(图 3a,d),说明 C1、C2、SD 和 Qz 的形成时间可能早于缝合线,而孔洞中充填的巨晶方解石(VC)切割了缝合线(图 3a),表明 VC 的形成时间晚于缝合线。

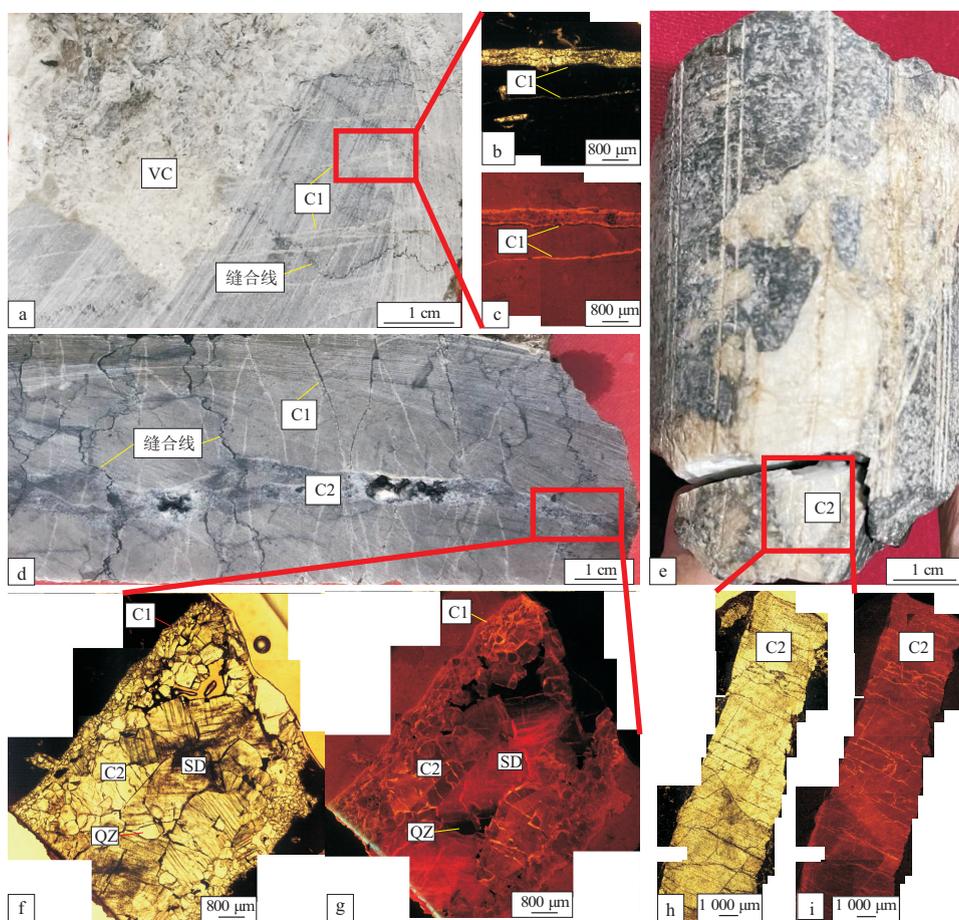


图 3 塔里木盆地顺北 4 号走滑断裂带中—下奥陶统碳酸盐岩缝洞充填物特征

a. 岩心照片,孔洞中充填巨晶方解石(VC),另可见近层面发育的裂缝被方解石(C1)充填,其中 VC 方解石切割缝合线,而缝合线切割 C1 方解石,顺北 A 井,7 412.03 m,  $O_2y_j$ ; b, c 为 a 中红框区域的单偏光和阴极光照片,可见 C1 方解石在阴极射线线下具有橙色的发光性; d. 岩心照片,缝合线切割二期裂缝,顺北 A 井,  $O_2y_j$ ; e. 岩心照片,高角度裂缝被方解石充填,顺北 B 井; f, g 为 d 红框中的单偏光和阴极光照片,其中,裂缝中沿边缘向中心依次分布两期方解石(C1, C2)、鞍形白云石(SD)和石英(Qz); h, i 为 e 红框中的单偏光和阴极光照片,见裂缝被方解石(C2)充填,在阴极射线线下具有中等橙色的发光性

Fig.3 Characteristics of fracture-pore cements in Lower-Middle Ordovician carbonates in Shunbei No. 4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

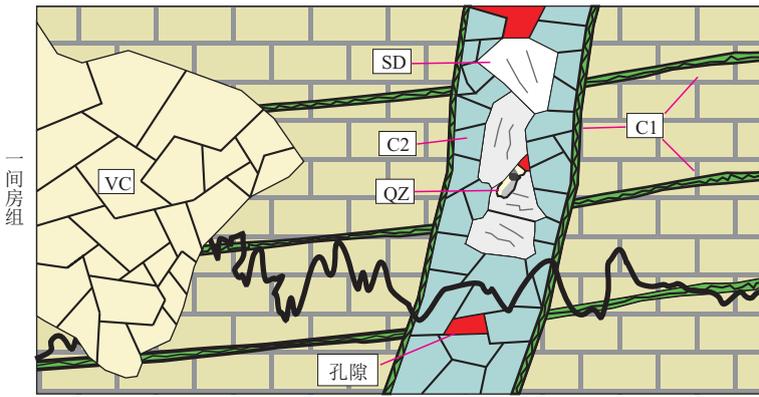


图4 塔里木盆地顺北4号走滑断裂带中下奥陶统成岩演化序列示意

Fig.4 Paragenetic sequence of Lower-Middle Ordovician carbonates in Shunbei No.4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

基于这些岩石学观察,可以确定缝合线形成之前的早成岩作用包括破裂作用、方解石(C1和C2)的胶结作用、鞍形白云石(SD)和石英(QZ)胶结,晚成岩作用包括发生破裂/溶蚀作用以及孔洞中方解石(VC)的充填作用。故成岩序列可确定为C1→C2→SD→QZ→缝合线→VC(图4)。

### 3.2 原位锶同位素和稀土元素

本研究针对顺北4号断裂带取心段中5块样品的方解石C2进行了原位锶同位素测试,总计16个剥蚀点,其测试结果显示<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值介于0.708 498~0.709 177,平均值为0.708 990(表1)。

本研究还针对顺北4号断裂带取心段中4块样品的方解石C2进行了原位微量元素测试,共计12个剥蚀点(表2)。12个测试点的Al含量为

(0.003~9.576)×10<sup>-6</sup>(平均1.156×10<sup>-6</sup>),Sc含量为(0.017~0.550)×10<sup>-6</sup>(平均0.142×10<sup>-6</sup>),Mn含量为(59.0~125.2)×10<sup>-6</sup>(平均112.8×10<sup>-6</sup>),Sr含量为(105.4~599.3)×10<sup>-6</sup>(平均343.8×10<sup>-6</sup>),Ba含量为(0.025~0.341)×10<sup>-6</sup>(平均0.164×10<sup>-6</sup>)。REE含量(∑REE)为(0.04~14.84)×10<sup>-6</sup>(平均值3.58×10<sup>-6</sup>),Y/Ho值为30.0~87.2(平均值50.0),Eu异常为1.34~8.39,Ce异常为0.58~1.05,其配型见图5。

所有样品的Al和Sc含量均较低,可以排除样品受到陆源碎屑混染的情况<sup>[33]</sup>;此外,所有样品的Ba含量均较低,可以排除Eu的测试受到Ba影响的情况。因此,样品获得的稀土元素信号能带代表方解石本身的稀土元素分布特征。

### 3.3 方解石U-Pb定年

针对两件方解石样品中的C2进行了U-Pb定年。样品SHB42-1共剥蚀了80个点,<sup>238</sup>U含量为(0.002~0.111)×10<sup>-6</sup>,总Pb含量为(0.026~0.424)×10<sup>-6</sup>,获得的等时线年龄为(433±17)Ma,对应于中奥陶世—早泥盆世(图6a)。样品SHB42-3共剥蚀了79个点,<sup>238</sup>U含量为(0.001~0.376)×10<sup>-6</sup>,总Pb含量为(0.004~0.520)×10<sup>-6</sup>,获得的等时线年龄为(449±15)Ma,对应于中奥陶世—早志留世(图6b)。

## 4 讨论

### 4.1 流体特征

稀土元素和锶同位素是常用的沉积盆地碳酸盐岩中流体的示踪手段,本研究针对顺北4号带裂缝方解石C2进行了原位锶同位素和稀土元素分析,能够帮助我们刻画断裂带内流体的特征。

原位稀土元素结果所展示的∑REE变化较大,在(0.03~14.84)×10<sup>-6</sup>之间,这可能与流体受围岩改造的程度相关。但是,所有样品均表现出3个

表1 塔里木盆地顺北4号带方解石C2的原位<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值

Table 1 In situ Sr-isotope analysis of calcite C<sub>2</sub> cement in Shunbei No. 4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

样品编号	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	相对误差
SHB4-1-01	0.708 498	0.000 058
SHB4-1-02	0.708 705	0.000 074
SHB4-1-03	0.708 608	0.000 072
SHB4-2-01	0.709 040	0.000 043
SHB4-2-02	0.709 174	0.000 037
SHB4-2-03	0.708 937	0.000 040
SHB4-3-01	0.709 115	0.000 044
SHB4-3-02	0.709 175	0.000 045
SHB4-3-03	0.709 177	0.000 064
SHB4-4-01	0.709 049	0.000 074
SHB4-4-02	0.709 051	0.000 069
SHB4-4-03	0.709 145	0.000 059
SHB4-4-04	0.709 083	0.000 075
SHB4-6-01	0.709 127	0.000 072
SHB4-6-02	0.708 847	0.000 178
SHB4-6-03	0.709 111	0.000 097

表 2 塔里木盆地顺北 4 号段裂带方解石 C<sub>2</sub> 的原位微量元素含量

Table 2 In situ trace element contents of calcite C<sub>2</sub> cement in Shunbei No. 4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

微量元素	样品											
	SHB4-2-1	SHB4-2-2	SHB4-3-1	SHB4-3-2	SHB4-3-3	SHB4-4-5	SHB4-4-3	SHB4-4-8	SHB4-4-9	SHB4-4-10	SHB4-4	SHB4-5
Al/10 <sup>-6</sup>			0.167	0.003	0.086	0.172		9.576	0.031	0.175	0.090	0.100
Sc/10 <sup>-6</sup>	0.017	0.049	0.070	0.119	0.098	0.061	0.062	0.051	0.077	0.057	0.550	0.490
Mn/10 <sup>-6</sup>	79.0	73.5	73.8	118.1	108.4	69.3	125.2	59.0	106.6	117.4	210.7	213.0
Sr/10 <sup>-6</sup>	301.1	497.8	599.3	421.6	184.7	381.4	105.4	543.8	511.8	223.9	174.0	181.0
Ba/10 <sup>-6</sup>	0.058	0.340	0.341	0.262	0.063	0.165		0.037	0.265	0.025	0.059	0.190
La/10 <sup>-6</sup>	0.007	0.012	0.006	0.022	0.005	0.007	0.072	0.206	0.675	1.113	2.460	1.670
Ce/10 <sup>-6</sup>	0.013	0.024	0.008	0.030	0.010	0.028	0.161	0.272	1.368	2.703	6.240	4.240
Pr/10 <sup>-6</sup>	0.002	0.005	0.001	0.005	0.003	0.006	0.026	0.045	0.251	0.529	0.773	0.512
Nd/10 <sup>-6</sup>	0.012	0.015	0.006	0.021	0.014	0.018	0.123	0.204	1.080	2.437	2.890	1.900
Sm/10 <sup>-6</sup>	0.001	0.008	0.003	0.005	0.003	0.006	0.030	0.041	0.273	0.706	0.640	0.410
Eu/10 <sup>-6</sup>	0.001	0.003	0.002	0.008	0.002	0.003	0.013	0.011	0.169	0.245	0.163	0.105
Gd/10 <sup>-6</sup>	0.003	0.008	0.002	0.006	0.005	0.008	0.037	0.051	0.362	0.995	0.624	0.385
Tb/10 <sup>-6</sup>	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	0.006	0.052	0.169	0.081	0.054
Dy/10 <sup>-6</sup>	0.002	0.004	0.003	0.006	0.006	0.008	0.023	0.028	0.326	1.137	0.448	0.318
Y/10 <sup>-6</sup>	0.028	0.081	0.035	0.056	0.067	0.096	0.213	0.281	2.637	8.742	2.570	2.070
Ho/10 <sup>-6</sup>	0.000	0.002	0.000	0.001	0.002	0.002	0.004	0.005	0.062	0.237	0.086	0.061
Er/10 <sup>-6</sup>	0.001	0.004	0.001	0.002	0.003	0.005	0.013	0.010	0.153	0.627	0.218	0.154
Tm/10 <sup>-6</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.015	0.073	0.031	0.019
Yb/10 <sup>-6</sup>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.007	0.003	0.079	0.388	0.166	0.135
Lu/10 <sup>-6</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.008	0.049	0.023	0.020
ΣREE/10 <sup>-6</sup>	0.05	0.09	0.04	0.11	0.06	0.10	0.52	0.89	4.87	11.41	14.84	9.98
Eu 异常	4.18	2.35	4.52	8.39	1.86	1.96	2.28	1.40	2.84	1.44	1.35	1.34
Ce 异常	0.72	0.71	0.64	0.67	0.58	0.85	0.83	0.65	0.75	0.76	1.03	1.05
Y/Ho	67.6	52.8	87.2	57.9	44.2	39.2	53.2	54.9	42.3	37.0	30.0	33.9

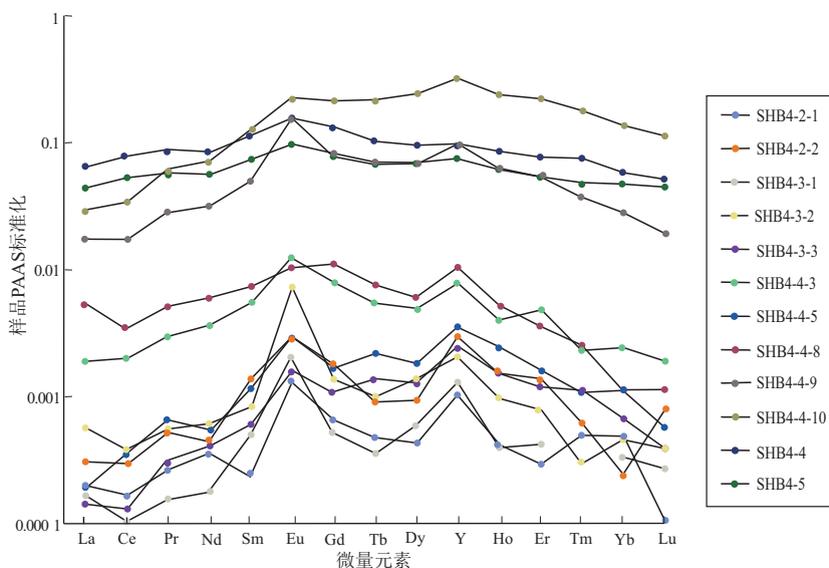


图 5 塔里木盆地顺北地区中下奥陶统裂缝方解石充填物的原位稀土元素配型 PAAS 为澳大利亚太古宙后平均页岩成分中的稀土元素。

Fig.5 REEY profiles of fracture cements in Lower-Middle Ordovician carbonates in Shunbei No.4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

重要的特征:Ce 负异常 (0.58 ~ 1.05)、Eu 正异常 (1.34 ~ 8.39) 和高 Y/Ho 比值。

Eu 是讨论比较充分的一种变价稀土元素,具

有 Eu<sup>2+</sup> 和 Eu<sup>3+</sup> 两种离子形态<sup>[34-35]</sup>。在高温 (大约大于 250 °C) 还原环境中, Eu<sup>3+</sup> 被还原成 Eu<sup>2+</sup>, 由于 Eu<sup>3+</sup> 更容易被吸附且 EuCl<sup>+</sup> 在流体中稳定性更

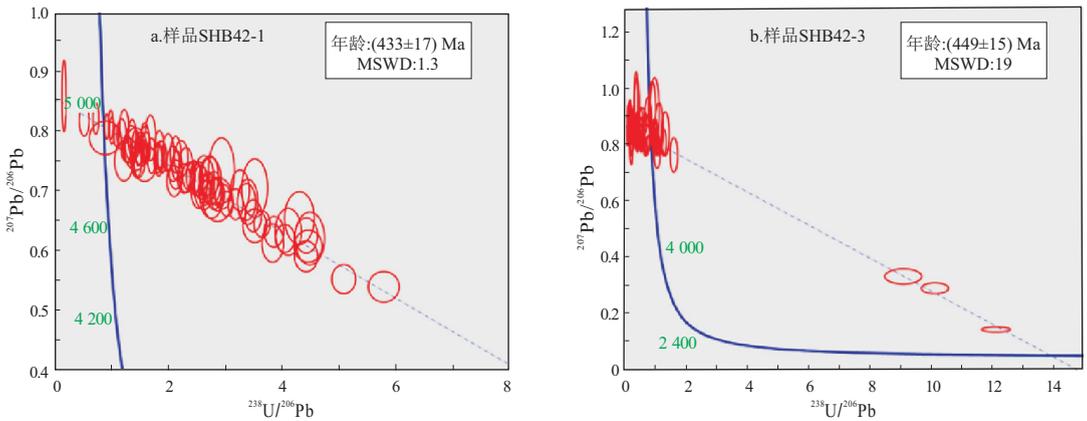


图6 塔里木盆地顺北4号走滑断裂带中一下奥陶统碳酸盐岩裂缝充填物的U-Pb定年结果  
图中绿色数值为协和线的数学理论值。

Fig.6 U-Pb dating of fracture cements in Lower-Middle Ordovician carbonates in Shunbei No.4 strike-slip fault zone, Tarim Basin

强<sup>[36]</sup>,导致流体中Eu相对于其他REE富集。然而,由于Eu<sup>2+</sup>离子半径大于Ca<sup>2+</sup>,因此,碳酸盐矿物中出现Eu正异常说明Eu是以Eu<sup>3+</sup>的形式存在的<sup>[35]</sup>。总的来说,C2方解石中的Eu正异常说明C2在从流体沉淀之前,流体经历过较高的温度(大约大于250℃),而C2沉淀时,流体温度相对较低(大约小于250℃)<sup>[34,36]</sup>。

Ce同样是一种变价稀土元素,具有Ce<sup>3+</sup>和Ce<sup>4+</sup>两种离子形态。海水中,Ce<sup>3+</sup>被氧化成Ce<sup>4+</sup>,Ce<sup>4+</sup>更容易被锰铁氧化物吸附,导致海水中Ce相对其他REE亏损,因此,海相碳酸盐矿物中常出现Ce负异常<sup>[37]</sup>。然而,Eu正异常的存在说明流体的温度可能较高,在这种流体环境下,Ce<sup>3+</sup>被氧化成Ce<sup>4+</sup>所需要的氧逸度非常高,因此,C2方解石中出现的Ce负异常不太可能是流体中Ce发生分馏造成的,而更可能是流体继承了源岩(或者流体淋滤过的岩层)的Ce负异常<sup>[38]</sup>。在海相碳酸盐岩中最可能具有Ce负异常的源岩即为海相碳酸盐岩本身,因此,Ce方解石中出现的Ce负异常可能来源于围岩。

高Y/Ho比值可能有两种情况:(1)流体中Cl<sup>-</sup>和F<sup>-</sup>作为REE搬运的主要配体,导致Y相对于Ho富集<sup>[39]</sup>; (2)流体继承了源岩(或者流体淋滤过的岩层)的高Y/Ho比值。Cl<sup>-</sup>和F<sup>-</sup>作为REE搬运的主要配体需要流体具有较低的pH值(<6,酸性环境)<sup>[40]</sup>,碳酸盐岩中显然不可能存在pH值小于6的酸性流体长距离运移<sup>[41]</sup>。因此,C2方解石中较高的Y/Ho比值更可能是由于流体继承了源岩(或者流体淋滤过的岩层)的高Y/Ho比值,而海相碳酸盐岩中具有高Y/Ho比值的源岩即为海相碳酸盐岩本身<sup>[42]</sup>。

同样,C2方解石的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值(0.708 498~0.709 177)与MCARTHUR等<sup>[43]</sup>报道的寒武纪—奥陶纪海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值(0.707 8~0.709 0)相当,也与ZHU等<sup>[44]</sup>报道的塔里木盆地奥陶系灰岩的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值(0.708 150~0.709 104)相当,说明流体没有显著的淋滤富含长英质的岩层,或者流体已经与碳酸盐岩发生了充分的反应。

综上所述,C2方解石的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值、Ce负异常和高Y/Ho比值说明流体充分继承了碳酸盐岩围岩的特征,而Eu正异常则说明C2方解石在沉淀之前流体经历了较高的温度。

#### 4.2 流体活动时间及流体活动机制

通过对两块样品方解石C2的U-Pb定年获得的年龄分别为(433±17)Ma和(449±15)Ma,对应于中奥陶世—早志留世,也即塔里木盆地的加里东中期I幕和III幕运动。这一时期,塔里木板块南缘的古昆仑洋板块向北东方向俯冲以及塔里木盆地东南缘阿尔金山碰撞造山,使得研究区内整体处于挤压背景。因此,顺北4号带裂缝方解石C2记录的很可能是挤压背景下的断裂流体活动,并且方解石C2的REE特征和配型也与前人报道的挤压背景下的热液矿物的REE特征相似<sup>[38,45]</sup>。

加里东中期I幕运动(中奥陶世末),塔里木板块南缘的古昆仑洋板块向北东方向俯冲,导致研究区内受到挤压,塔中I号断裂带开始形成西高东低的格局。最新的研究成果显示,这一时期顺托果勒地区只是形成了区域性节理<sup>[2-3]</sup>。而在塔里木盆地东南部,中寒武世—奥陶纪阿尔金山发生强烈俯冲,阿尔金洋盆闭合的时间大约为奥陶纪—志留纪<sup>[46]</sup>。这一时期,塔里木盆地东南部的强烈俯冲和洋盆闭合造成了自南东向北西方向的强烈挤压

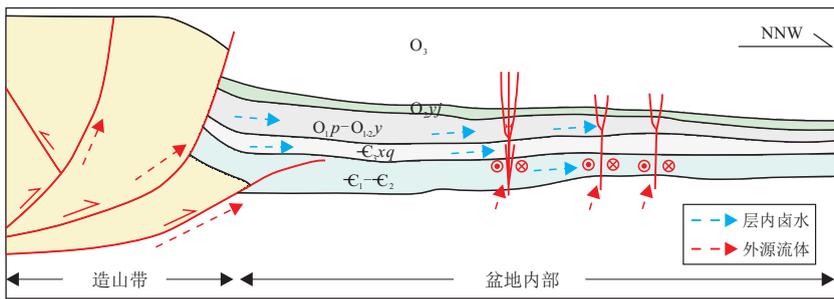


图7 挤压背景下断裂流体活动示意

Fig.7 Activities of fault-related fluids in compression environment

应力,这种区域挤压应力是塔中及顺托果勒地区走滑断裂体系的主要形成因素<sup>[2]</sup>,因此,顺北4号断裂带C2方解石记录的更可能是加里东中期Ⅲ幕运动的断裂流体活动。

挤压背景下的断裂流体活动是一种研究程度相对较高的断裂流体活动模式,例如加拿大的科迪勒拉造山带、意大利的亚平宁造山带、美国的阿帕拉契亚造山带等<sup>[47-49]</sup>。挤压背景下,深层卤水和下渗淡水分别在挤压超压和水头的驱动下从造山带向盆地内运移,而前人估计的这类流体的显著影响碳酸盐岩的范围大约为100~200 km<sup>[47]</sup>。顺北4号断裂带距塔里木盆地东南缘车尔臣断裂和阿尔金造山带均超过200 km,顺北4号断裂带远离造山带。此外,我们的研究显示裂缝方解石C2的样品分别来自走滑断裂带围岩区(A井)和近断裂带内部(B井)(图2),但其岩石学特征较为一致(图3),并且这些方解石都表现出了充分继承碳酸盐岩围岩的地球化学特征,说明流体由断裂带内部向围岩区运移之前可能已经与碳酸盐岩发生了充分的反应。因此,方解石C2的地球化学信号记录了加里东中期Ⅲ幕阿尔金造山带挤压造山时期的远端断裂流体活动,由走滑断裂活动形成的裂缝体系及缝洞型储集体为这些流体提供了运移的通道和持续性水—岩反应的场所(图7)。

## 5 结论

(1)通过对塔里木盆地顺托果勒地区顺北4号断裂带裂缝方解石C2的原位微量元素和原位锶同位素的研究,发现方解石C2的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值与寒武纪—奥陶纪海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值相当,稀土元素表现出Ce负异常、Eu正异常和高Y/Ho比值的特征,这些特征显示方解石C2记录的断裂流体经历了较高的温度,并充分继承了碳酸盐岩围岩的特征。

(2)顺托果勒地区顺北4号断裂带顺北42井

两块样品中C2方解石的U-Pb测年结果分别为(433±17) Ma和(449±15) Ma,对应于中奥陶世—早志留世的加里东中期Ⅰ幕和Ⅲ幕运动。由于加里东中期Ⅰ幕运动研究区内构造变形较弱,因此认为方解石C2记录了加里东中期Ⅲ幕阿尔金造山带挤压造山时期的远端断裂流体活动。

## 参考文献:

- [1] 漆立新, 云露. 塔里木盆地碳酸盐岩成藏模式与勘探实践[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 867-876.  
QI Lixin, YUN Lu. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 867-876.
- [2] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142.  
YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.
- [3] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1111-1126.  
DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: a case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(6): 1111-1126.
- [4] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 965-974.  
WANG Bin, ZHAO Yongqiang, HE Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 965-974.
- [5] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975-984.  
CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975-984.
- [6] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征

- 及油气意义;以顺北地区1号和5号断裂为例[J].石油学报,2021,42(7):906-923.
- LIN Bo,ZHANG Xu,KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and their hydrocarbon significance: a case study of No.1 fault and No.5 fault in Shunbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 906-923.
- [7] 韩俊,况安鹏,能源,等.顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J].新疆石油地质,2021,42(2):152-160.
- HAN Jun,KUANG Anpeng,NENG Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No.5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 152-160.
- [8] 黄诚,云露,曹自成,等.塔里木盆地顺北地区中—下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J].石油与天然气地质,2022,43(1):54-68.
- HUANG Cheng,YUN Lu,CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture - vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.
- [9] 漆立新,云露,曹自成,等.顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向[J].新疆石油地质,2021,42(2):127-135.
- QI Lixin,YUN Lu,CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei oil & gas field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 127-135.
- [10] 李映涛,漆立新,张哨楠,等.塔里木盆地顺北地区中—下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J].石油学报,2019,40(12):1470-1484.
- LI Yingtao,QI Lixin,ZHANG Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [11] 吕海涛,韩俊,张继标,等.塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J].石油实验地质,2021,43(1):14-22.
- LÜ Haitao,HAN Jun,ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 14-22.
- [12] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,2022,49(1):1-17.
- MA Yongsheng,CAI Xunyu,YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [13] 金之钧,朱东亚,胡文瑄,等.塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J].地质学报,2006,80(2):245-253.
- JIN Zhijun,ZHU Dongya,HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253.
- [14] 金之钧,朱东亚,孟庆强,等.塔里木盆地热液流体活动及其对油气运移的影响[J].岩石学报,2013,29(3):1048-1058.
- JIN Zhijun,ZHU Dongya,MENG Qingqiang, et al. Hydrothermal activities and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1048-1058.
- [15] QING Hairuo,CHI Guoxiang,ZHANG Shaonan. Origin of coarse-crystalline calcite cement in Early Ordovician carbonate rocks, Ordos Basin, northern China: insights from oxygen and carbon isotopes and fluid inclusion microthermometry [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89(1/3): 344-347.
- [16] DONG Shaofeng, CHEN Daizhao, QING Hairuo, et al. Hydrothermal alteration of dolostones in the Lower Ordovician, Tarim Basin, NW China: multiple constraints from petrology, isotope geochemistry and fluid inclusion microthermometry [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 46: 270-286.
- [17] DONG Shaofeng, CHEN Daizhao, ZHOU Xiqiang, et al. Tectonically driven dolomitization of Cambrian to Lower Ordovician carbonates of the Quruqtagh area, north-eastern flank of Tarim Basin, north-west China [J]. Sedimentology, 2017, 64(4): 1079-1106.
- [18] 李映涛,叶宁,袁晓宇,等.塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J].石油与天然气地质,2015,36(6):934-944.
- LI Yingtao, YE Ning, YUAN Xiaoyu, et al. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in well Shunnan 4, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 934-944.
- [19] LU Ziyue, CHEN Honghan, QING Hairuo, et al. Petrography, fluid inclusion and isotope studies in Ordovician carbonate reservoirs in the Shunnan area, Tarim Basin, NW China: implications for the nature and timing of silicification [J]. Sedimentary Geology, 2017, 359: 29-43.
- [20] 滕建彬.东营凹陷页岩油储层中方解石的成因及证据[J].油气地质与采收率,2020,27(2):18-25.
- TENG Jianbin. Origin and evidence of calcite in shale oil reservoir of Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 18-25.
- [21] MORROW D W. Zebra and boxwork fabrics in hydrothermal dolomites of northern Canada: indicators for dilational fracturing, dissolution or in situ replacement? [J]. Sedimentology, 2014, 61(4): 915-951.
- [22] JIANG Lei, CAI Chunfang, WORDEN R H, et al. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north-west China [J]. Sedimentology, 2016, 63(7): 2130-2157.
- [23] 邓尚,李慧莉,张仲培,等.塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J].石油与天然气地质,2018,39(5):878-888.
- DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888.
- [24] 邓尚,李慧莉,韩俊,等.塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段

- 活动特征及其地质意义[J].石油与天然气地质,2019,40(5):990-998.
- DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5):990-998.
- [25] LI Bing, ZHAO Rui, KONG Qiangfu, et al. An Ordovician carbonate reservoir in strike-slip structures producing from fault-associated fracture systems, 3D seismic region of northern Shun 8 block (Tarim Basin)[J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3):545-556.
- [26] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1):109-137.
- [27] QIU Huabiao, DENG Shang, CAO Zicheng, et al. The evolution of the complex anticlinal belt with crosscutting strike-slip faults in the central Tarim Basin, NW China[J]. Tectonics, 2019, 38(6):2087-2113.
- [28] 陈祺俊,何登发,孙方源,等.塔北古隆起的三维地质结构及相关问题探讨[J].地学前缘,2019,26(1):121-133.
- CHEN Jiajun, HE Dengfa, SUN Fangyuan, et al. Three-dimensional geological modeling of the Tabei paleo-uplift and discussion on related issues[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1):121-133.
- [29] 黄太柱,蒋华山,马庆佑.塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气成藏特征[J].石油与天然气地质,2014,35(6):780-787.
- HUANG Taizhu, JIANG Huashan, MA Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in Lower Paleozoic carbonate reservoirs of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6):780-787.
- [30] TONG Xirun, LIU Yongsheng, HU Zhaochu, et al. Accurate determination of Sr isotopic compositions in clinopyroxene and silicate glasses by LA-MC-ICP-MS[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2016, 40(1):85-99.
- [31] PATON C, HELSTROM J, PAUL B, et al. Lolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2011, 26(12):2508-2518.
- [32] 沈安江,胡安平,程婷,等.激光原位 U-Pb 同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1062-1074.
- SHEN Anjiang, HU Anping, CHENG Ting, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6):1062-1074.
- [33] VAN SMEERDIJK HOOD A, WALLACE M W. Extreme ocean anoxia during the Late Cryogenian recorded in reefal carbonates of southern Australia[J]. Precambrian Research, 2015, 261:96-111.
- [34] BAU M, MÖLLER P. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite[J]. Mineralogy & Petrology, 1992, 45(3):231-246.
- [35] CAI Chunfang, LI Kaikai, LI Hongtao, et al. Evidence for cross-formational hot brine flow from integrated  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in central Tarim, China[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(8):2226-2235.
- [36] BAU M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. Chemical Geology, 1991, 93(3/4):219-230.
- [37] GONG Qiaolin, LI Fei, LU Chaojin, et al. Tracing seawater- and terrestrial-sourced REE signatures in detritally contaminated, diagenetically altered carbonate rocks[J]. Chemical Geology, 2021, 570:120169.
- [38] BAU M, ROMER R L, LÜDERS V, et al. Tracing element sources of hydrothermal mineral deposits; REE and Y distribution and Sr-Nd-Pb isotopes in fluorite from MVT deposits in the Pennine Orefield, England[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(8):992-1008.
- [39] BAU M, DULSKI P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 119(2/3):213-223.
- [40] MIGDISOV A, WILLIAMS-JONES A E, BRUGGER J, et al. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: experimental data and thermodynamic calculations[J]. Chemical Geology, 2016, 439:13-42.
- [41] MACHEL H. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights[J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2):143-175.
- [42] LI Fei, YAN Jiaxin, BURNE R V, et al. Paleo-seawater REE compositions and microbial signatures preserved in laminae of Lower Triassic ooids[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 486:96-107.
- [43] MCARTHUR J M, HOWARTH R J, BAILEY T R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age[J]. The Journal of Geology, 2001, 109(2):155-170.
- [44] ZHU Dongya, LIU Quanyou, ZHANG Juntao, et al. Types of fluid alteration and developing mechanism of deep marine carbonate reservoirs[J]. Geofluids, 2019, 2019:3630915.
- [45] GE Xiang, SHEN Chuanbo, ZHOU Renjie, et al. Tracing fluid evolution in sedimentary basins with calcite geochemical, isotopic and U-Pb geochronological data: implications for petroleum and mineral resource accumulation in the Nanpanjiang Basin, South China[J]. GSA Bulletin, 2021, <https://doi.org/10.1130/B36168.1>.
- [46] 崔军文,唐哲民.塔里木盆地构造格架和构造应力场分析[J].岩石学报,2011,27(1):231-242.
- CUI Junwen, TANG Zhemin. Tectonic framework of the Tarim Basin and its tectonic stress field analysis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):231-242.
- [47] MACHEL H G, CAVELL P A. Low-flux, tectonically-induced squeegee fluid flow ("hot flash") into the Rocky Mountain Foreland Basin[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1999, 47(4):510-533.
- [48] WENZ Z J, APPOLD M S, SHELTON K L, et al. Geochemistry of Mississippi Valley-type mineralizing fluids of the Ozark Plateau: a regional synthesis[J]. American Journal of Science, 2012, 312(1):22-80.
- [49] GABELLONE T, GASPARRINI M, IANNACE A, et al. Fluid channeling along thrust zones: the Lagonegro case history, southern Apennines, Italy[J]. Geofluids, 2013, 13(2):140-158.