

引用格式: 薛一帆, 文志刚, 黄亚浩, 等. 深层—超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究——以塔里木盆地富满油田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 549–559.

XUE Yifan, WEN Zhigang, HUANG Yahao, et al. Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone: A case study of Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 549–559.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.004

# 深层—超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究

——以塔里木盆地富满油田为例

薛一帆<sup>1</sup>, 文志刚<sup>1</sup>, 黄亚浩<sup>1</sup>, 张银涛<sup>2</sup>, 乔占峰<sup>3</sup>, 张天付<sup>3</sup>, 李梦勤<sup>2</sup>, 王 彭<sup>2</sup>

(1. 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 以富满油田北部走滑断裂带深部储层孔洞缝充填脉体为研究对象, 基于脉体的岩相学特征、微区稀土元素和Sr(锶)同位素、油包裹体荧光光谱、显微热力学和碳酸盐岩U-Pb同位素定年进行分析。结果表明: 富满油田北部走滑断裂带发育2期方解石脉体, 脉体来源于中下奥陶统海源地层水, 未见氧化性流体侵入, 表明深层—超深层油气晚期具有良好的封闭性。通过包裹体测温投点埋藏史结合碳酸盐岩低U-Pb同位素定年技术, 厘定塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带深部奥陶系存在3期油气充注过程, 分别对应于距今(459±7.2) Ma(加里东中期)、(348±18) Ma(海西早期)和268 Ma(海西晚期), 富满油田北部深层—超深层碳酸盐岩油气成藏关键期为海西早期, 且油气充注与断裂活动有较好的对应关系。

**关键词:** 塔里木盆地; 富满油田; 油气成藏; 流体包裹体; U-Pb同位素定年; 流体演化

中图分类号: TE122

文献标识码: A

## Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone: A case study of Fuman Oilfield, Tarim Basin

XUE Yifan<sup>1</sup>, WEN Zhigang<sup>1</sup>, HUANG Yahao<sup>1</sup>, ZHANG Yintao<sup>2</sup>, QIAO Zhanfeng<sup>3</sup>, ZHANG Tianfu<sup>3</sup>, LI Mengqin<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;

3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** The study of the filling veins in deep reservoirs within the strike-slip fault zone in the north of Fuman Oilfield utilizes a range of methods including petrographic characteristics, analysis of rare earth elements and Sr (strontium) isotopes, fluorescence spectra of oil inclusions, microscopic thermodynamics, and U-Pb isotopic dating of carbonate rocks. The findings reveal two stages of calcite vein formation in this area. These veins originate from the formation water of the middle and Lower Ordovician sources, with no evidence of oxidizing fluid intrusion, suggesting that the deep to ultra-deep oil and gas reserves have maintained good sealing properties in later stages. Furthermore, based on the burial history deduced from inclusions and low U-Pb isotope dates from carbonate rocks, it has been determined that there are three distinct stages of hydrocarbon charging in the deep Ordovician strata of the northern strike-slip fault zone in the Tarim Basin. These stages correspond to (459±7.2) Ma (middle Caledonian), (348±18) Ma (early Hercynian), and 268 Ma (late Hercynian). It is noted that the early Hercynian period was the key phase for hydrocarbon accumulation in the deep and ultra-deep carbonate rocks in the north of Fuman Oilfield, with a significant correlation observed between oil and gas charging and fault activity.

**Keywords:** Tarim Basin; Fuman Oilfield; hydrocarbon accumulation process; fluid inclusion; U-Pb isotope dating; fluid evolution

收稿日期: 2024-02-19。

第一作者简介: 薛一帆(2003—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事油气成藏机理研究。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学城路111号长江大学, 邮政编码: 430100。E-mail: xyf257248@163.com

通信作者简介: 黄亚浩(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事油气成藏机理研究。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学城路111号长江大学, 邮政编码: 430100。E-mail: hyhr08916@163.com

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其对油气成藏响应研究——以塔里木盆地富满地区为例”(RIPED-2022-JS-2382)。

近年来,塔里木盆地深层—超深层碳酸盐岩油气领域勘探工作实现了重大进展,已经发展成为中国规模最大的超深层油气勘探生产基地,特别是富满油田,是中国深层领域中上产速度最快的超深油田<sup>[1-4]</sup>。油气总产量已经超过 $1\ 000\times 10^4$  t,其开采深度普遍超出6 000 m。钻井和三维地震资料数据揭示了深层油气资源与盆地内部的走滑断裂体系之间的关联性<sup>[5-6]</sup>。富满油田走滑断裂带内部储层纵向发育,以裂缝和溶蚀孔洞为主,储层内流体活动期次复杂,走滑断裂带活动导致储层发育的裂缝脉体可记录储层流体演化过程信息,很好地指示走滑断裂带流体活动和油气成藏过程<sup>[7]</sup>。岩心观察结果表明:该区域碳酸盐岩方解石脉非常发育,并伴随有多种烃类包裹体,反映了该区域多期次成藏的特点。在此基础上,通过研究方解石脉体的成岩流体成分、温压条件、流体环境和来源等信息明确叠合盆地内的流体活动,可以很好地指示走滑断裂带流体活动和油气成藏过程,这些流体活动参与了油气生成、运移、聚集和保存的全过程<sup>[8]</sup>。方解石脉中的流体包裹体记录了成矿时的温度、压力、流体类型及组成等信息,是获取流体活动信息的关键突破口。可用于明确流体活动的期次、温度、压力等信息,并且可以用于确定油气成藏的期次与过程。近来,一种新兴的高精度定年技术——激光原位方解石U-Pb同位素定年技术得到了发展,并成功应用于确定方解石脉的准确形成年代,有效克服了因盆地模拟的限制性条件及其多解性所带来的误差问题。这项技术对于精确追踪盆地流体的活动历史,揭示在多种流体作用下深部碳酸盐岩中的油气藏形成机制,有着重要的作用<sup>[9-10]</sup>。

以富满油田北部走滑断裂带储层为研究对象,基于储层孔缝洞内充填的方解石脉体岩相学、油包裹体荧光光谱、微区稀土元素、Sr(锶)同位素、显微热力学和U-Pb同位素定年等分析,对北部走滑断裂带不同典型井储层脉体的流体来源和不同期次油气充注时间进行研究。针对走滑断裂带不同油气富集程度和油气性质的油气藏,从流体演化和油气成藏过程内在关系的角度深入揭示走滑断裂带控藏作用和油气成藏主控因素,突破以往走滑断裂带成藏机理的认识,为重新认识走滑断裂带油气分布规律提供重要理论支撑。

## 1 区域地质概况

富满油田地处塔里木盆地北部坳陷中部的阿满过渡带,整体形状为马鞍状,东西向分别以满加尔坳陷与阿瓦提坳陷为界,北部与塔北隆起相邻,南接塔中隆起(图1a)。阿满过渡带是塔里木盆地内部相对稳定的构造单元,经历了多个构造演化阶段。从加里东早期到海西中晚期,

阿满过渡带经历了沉降、挤压和抬升等多种构造活动。在喜山期定型后,阿满过渡带整体稳定沉降并形成了如今的地质格局<sup>[11-13]</sup>。目前,富满油田主要油气勘探目的层位包括一间房组和鹰山组,油气藏主要由走滑断裂所控制,形成了缝洞型的碳酸盐岩断控体油藏,这些油气藏在平面上沿着I级走滑断裂或其相关的II级走滑断裂展布成条带状(图1b)。通常遵循着“大断裂带来大油藏,小断裂带来小油藏”的分布规律<sup>[14]</sup>。研究区奥陶系的地层依照从底层到顶层的排列分别是:蓬莱坝组、鹰山组、一间房组、吐木休克组、良里塔格组和桑塔木组(图1c)。从生产平面上来看,南北两大隆起走滑断裂的发育密度相对较低,而阿满过渡带走滑断裂的活跃度较高,其剖面特征非常明显<sup>[15]</sup>。不同的断裂带及同一断裂带内的不同断裂体圈闭下,油水界面不一致,通过分析钻探取心和测井的数据,目标层的主要储集空间是受到断裂破碎和岩溶作用影响的孔隙、洞穴和裂缝等。与塔北和塔中隆起不同,阿满过渡带具有特殊的断裂活动特征,并具有原地生烃、垂向运聚的复式油气藏体系,具有重要的勘探价值<sup>[16]</sup>。

## 2 样品和实验方法

实验样品采集于塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带F<sub>1</sub>11断裂带的FY1井、F<sub>1</sub>13断裂带的HD301井和F<sub>1</sub>15断裂带的YK1井碳酸盐岩储层中的方解石脉体。选取合适的样品在适当的位置研磨,并将其制成100 μm厚的双面抛光薄片,方解石脉和包裹体岩相学观察测试仪器为Maya2000Pro显微镜。接着,使用了CL8200MK5阴极发光仪(其工作电压为17 kV,电流设置为500 μA)进行了脉体阴极发光特性的测试。此外,通过LeicaDM2500显微镜,在保持相同曝光时间(70 Ms)和相同增益(1 s)的条件下,捕捉到了脉体的阴极发光图像。方解石脉的阴极发光颜色主要取决于Fe和Mn元素的含量,Mn<sup>2+</sup>通常是阴极发光主要的活化剂,而Fe<sup>2+</sup>是主要的猝灭剂,同时Fe和Mn元素的含量主要取决于成岩环境的氧化还原条件,因此,方解石脉的不同阴极发光颜色可以反映不同的形成时期<sup>[17]</sup>。在武汉上谱分析科技有限公司,利用激光剥蚀—电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)技术,对FY1井、HD301井和YK1井中的脉体及其周围的特定区域进行了稀土元素的微区原位分析。这项分析的过程中,每个测量点的背景数据收集时间约为30 s,使用的激光束直径为120 μm,而测量本身的时间持续了40 s。收集到的稀土元素数据随后通过海水标准化的方式进行处理,以生成标准的海水稀土元素配分模式图。此外,采用NIKON-LV100型双通道荧光透射光学显微镜对流体包

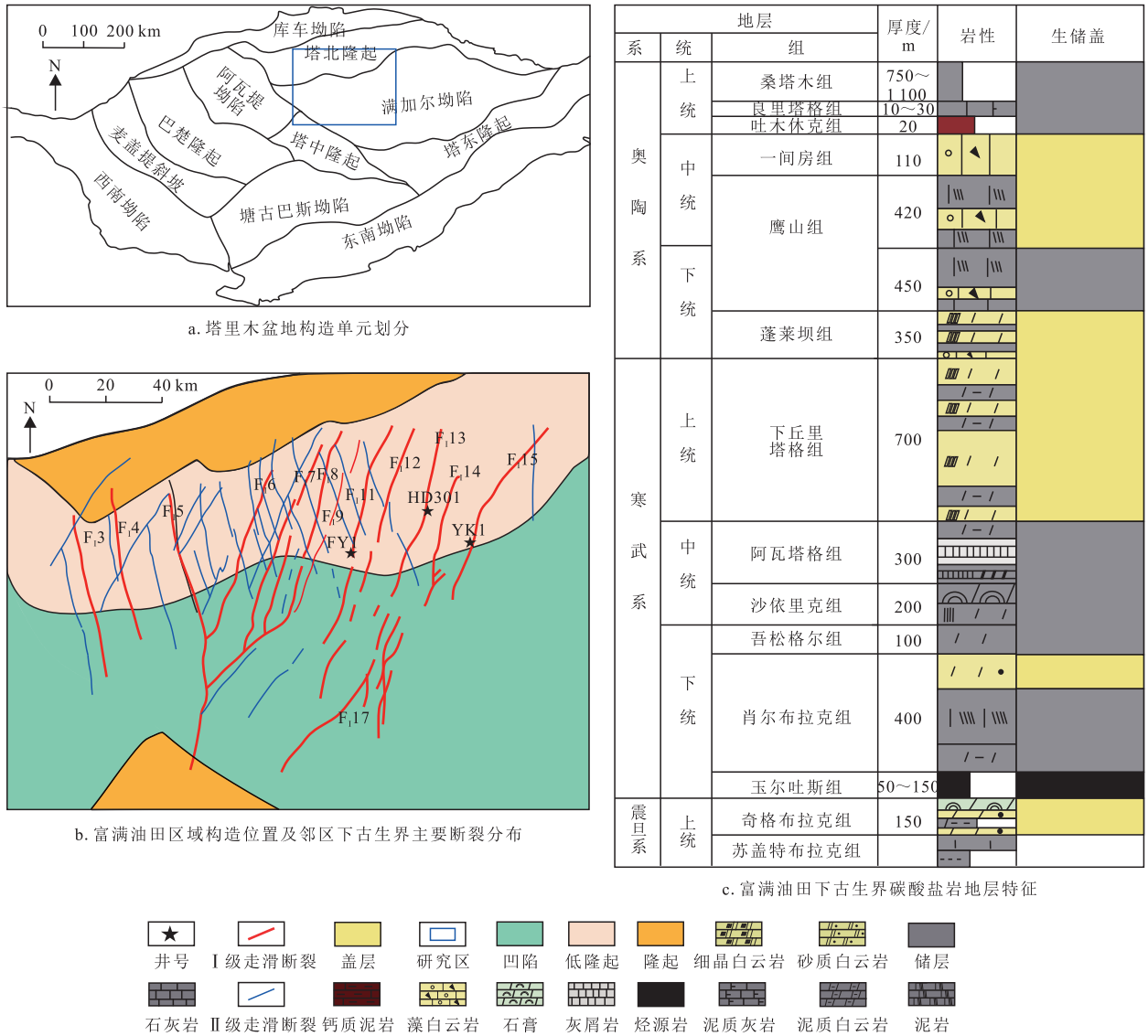


图1 塔里木盆地台盆区富满油田走滑断裂带构造位置与发育地层特征

Fig. 1 Structure location and developed strata features of strike-slip fault zone in Fuman Oilfield, Tarim Basin

裹体进行了岩相学分析,同时使用Maya2000型微型荧光光谱仪对这些流体包裹体进行了荧光光谱分析。包裹体进行显微热力学测量的测试仪器为Linkam THMS600G冷热台,所测出的温度数据误差为1℃。通过以每分钟1℃的速度增减温度,直到包裹体的相界面消失,然后在恒温状态下维持3 min并记录此时的温度。使用的激光原位方解石U-Pb同位素定年测量设备是结合了准分子激光剥蚀系统和四级杆等离子体质量谱仪的联合装置(Q-ICP-MS),这项测试在澳大利亚昆士兰大学的放射性同位素实验室进行。制备直径为2.5 cm的方解石靶样,通过环氧树脂将其固定并进行抛光。采用准分子激光技术对该靶样进行剥蚀加工。激光的斑点直径设置为100 μm,工作频率为10 Hz,能量密度达到3.0 J/cm<sup>2</sup>。对每个采样点,背景信号的采集时间设定为20 s,实际数据

采集持续25 s,而样品的清洁过程需要10 s。这一系列步骤旨在获得准确的样品年龄数据<sup>[18]</sup>。利用美国Platte River公司开发的Basinmod盆地模拟工具,对特定走滑断裂带的典型井进行了一维模拟分析,以研究该区域的埋藏历史和热历史。该模拟考虑了多种边界条件,如地层的厚度、剥蚀的厚度以及地层的绝对年龄等。此外,塔里木油田分公司提供的完井报告中包含了R<sub>0</sub>(镜质体反射率)值和井口温度的实测数据,这些数据被用于校准热史模拟。

### 3 方解石脉体流体来源

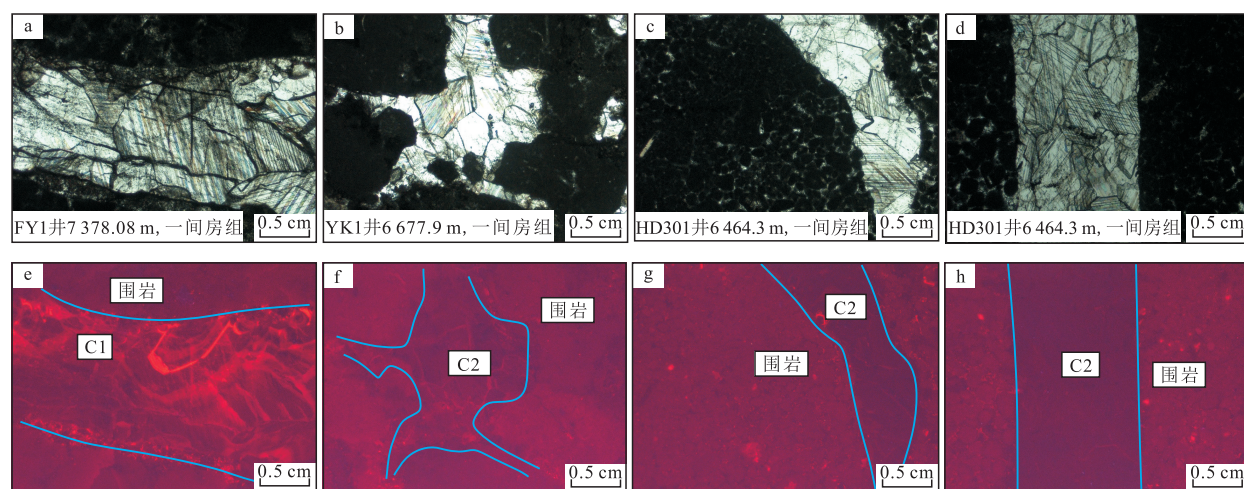
#### 3.1 方解石脉体发育期次

同一地层中的流体在不同地质历史时期的氧化还原

环境、流体来源和组分等方面可能有很大的差别,这就决定了流体信息在不同的方解石脉体中记录的差异很大<sup>[19-20]</sup>。通过结合阴极发光观察和稀土元素分析来确定方解石脉的发育期次。研究区储层主要发育2期方解石脉体(图2),第一期方解石脉体(C1)主要为裂缝充填的粗晶方解石,研究区内分布较广泛,这些方解石颗粒在透射光下表现出明亮的特性,但表面相对较脏,其解理发育十分明显,阴极光下呈现暗红色发光,Fe/Mn值介于6.219~7.405。第二期方解石脉体(C2)为裂缝和孔洞充填的中—粗晶方解石,脉体中发育许多微裂缝,在透射光下表现出明亮的特性,解理发育十分明显,阴极光下呈现暗红色发光,Fe/Mn值介于2.535~2.861。

### 3.2 稀土元素和Sr同位素特征

流体的侵蚀作用以及稀土元素在不同岩石类型中的选择性溶解过程,对岩石内稀土元素成分的形成产生重大影响,导致稀土元素分布模式的差异。这种分布模式在一定程度上能够揭示流体的来源及其地球化学特性<sup>[21-22]</sup>。利用海水稀土元素对富满油田北部方解石2期方解石脉体和围岩的稀土元素数据进行标准化处理(表1),得到海水标准化稀土元素配分模式,结果见图3。研究区储层方解石脉的 $\Sigma$ REE(稀土元素总量)变化介于0.205~4.936,总量偏低。因此,可以推断研究区方解石脉体中几乎没有被其他杂质矿物(如黏土)所干扰。2期



注:a,e为FY1井方解石脉透射光和阴极发光照片;b,f为YK1井方解石脉透射光和阴极发光照片;c,d为HD301井不同方解石脉透射光照片;g,h为HD301井不同方解石脉对应的阴极发光照片。

图2 塔里木盆地富满油田北部走滑断裂方解石脉的岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of calcite veins in strike-slip faults in northern Fuman Oilfield, Tarin Basin

表1 塔里木盆地富满油田奥陶系不同方解石脉和围岩稀土元素含量

Table 1 Rare earth element contents of different calcite veins and wall rocks of Ordovician in Fuman Oilfield, Tarim Basin

不同 期次 样品	La (镧)	Ce (铈)	Pr (镨)	Nd (钕)	Sm (钐)	Eu (铕)	Gd (钆)	Tb (铽)	Dy (镝)	Y (钇)	Ho (铈)	Er (铈)	Tm (铈)	Yb (镱)	Lu (镱)	Fe/ Mn	$\Sigma$ REE	$\delta$ Ce	$\delta$ Eu	LREE/ HREE
C1	0.344	1.796	0.262	0.241	0.312	0.179	0.143	0.120	0.124	1.027	0.118	0.096	0.068	0.059	0.068	7.405	4.936	5.932	0.786	3.942
C1	0.132	0.842	0.141	0.130	0.109	0.077	0.087	0.032	0.029	0.421	0.033	0.054	0.037	0.033	0.023	6.985	2.172	6.165	0.790	4.350
C1	0.126	1.022	0.180	0.139	0.142	0.181	0.100	0.059	0.062	0.539	0.069	0.061	0.030	0.025	0.031	6.219	2.528	6.674	1.501	4.097
围岩	0.161	1.156	0.189	0.180	0.172	0.180	0.118	0.099	0.062	0.528	0.062	0.049	0.049	0.048	0.036	17.370	2.889	6.604	1.244	3.906
围岩	0.124	0.848	0.146	0.132	0.108	0.044	0.049	0.058	0.048	0.351	0.029	0.014	0.010	0.026	0.032	13.764	2.032	6.282	0.567	5.277
C2	0.013	0.080	0.017	0.010	0.014	0	0.007	0.003	0.006	0.037	0.004	0.005	0	0.003	0.001	2.535	0.205	5.168	0	4.609
C2	0.060	0.295	0.041	0.034	0.023	0.004	0.012	0.010	0.002	0.055	0.006	0.007	0.003	0.004	0.005	2.822	0.636	5.837	0.250	9.303
C2	0.018	0.108	0.024	0.015	0.019	0.009	0.009	0.003	0.004	0.040	0.008	0.003	0.005	0.007	0.002	2.861	0.266	5.183	0.661	4.748
围岩	0.008	0.056	0.011	0.007	0.002	0.021	0.009	0.013	0.008	0.046	0.006	0.004	0.004	0.004	0	19.146	0.168	5.807	3.806	2.197
围岩	0.008	0.058	0.007	0.012	0.003	0.005	0.013	0.005	0.004	0.045	0.006	0.002	0.011	0.003	0.007	21.908	0.175	7.846	0.635	1.816

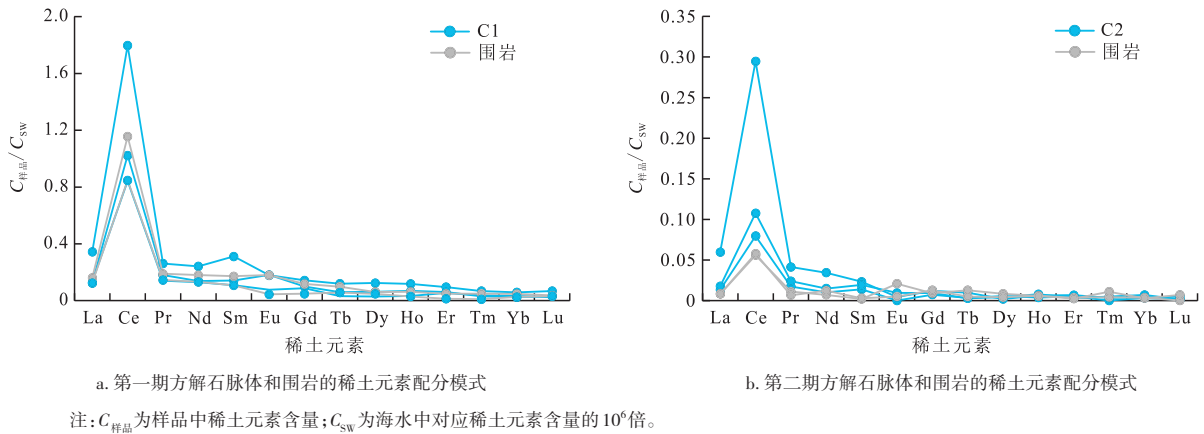


图3 塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带2期方解石脉体的稀土元素配分模式

Fig. 3 Rare earth element distribution patterns of two phases of calcite veins in strike-slip fault zone in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

方解石脉体稀土元素配分模式比较相似, LREE/HREE (轻稀土元素与重稀土元素比值)变化介于3.942~9.303, 轻稀土元素较富集,重稀土元素分布较平坦。 $\delta\text{Eu}$ (铕异常)介于0.250~1.501,  $\delta\text{Ce}$ (铈异常)介于5.168~6.674。针对富满油田北部一间房组储层2期方解石脉和围岩进行了Sr同位素测试,测试表明:研究区2期方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比较一致,其值主要介于0.708 5~0.708 8(图4)。

## 4 流体包裹体

### 4.1 流体包裹体岩相学

流体包裹体作为重要的流体示踪手段,在油气成藏过程中得到了广泛的应用<sup>[23-24]</sup>。在对流体包裹体进行研究时,岩相学观察是非常重要的。流体包裹体薄片透射光及烃类包裹体荧光观察表明富满油田北部断裂带储层方解石脉中含有大量的原生和次生油包裹体(图5),主要为原生油包裹体,位于方解石颗粒内,呈孤立或零星分布;次生油包裹体数量相对较少,主要以串珠状赋存于方解石裂纹。油包裹体总体个体较小,直径一般介于3~9  $\mu\text{m}$ ,小部分可达10~14  $\mu\text{m}$ ;形态大多数为水滴形或椭圆形,少数为不规则状。油包裹体中成分的差异导致了其在荧光下发光颜色的差别,并可用来识别油包裹体成熟度。油包裹体的荧光颜色会随着其成熟度的增加而呈现红、黄、蓝的变化趋势。在紫外光照射条件下,利用荧光光谱方法能对不同成熟度的油包裹体进行更准确的鉴别,降低了人眼观察的误差。目前普遍使用的反映油包裹体成熟度的荧光参数主要为峰值波长 $\lambda_{\text{max}}$ 和 $Q_{\text{F535}}$ 。 $\lambda_{\text{max}}$ 代表荧光光谱最大相对强度对应的波长值。而 $Q_{\text{F535}}$ 则表示720 nm到535 nm区间内的荧光光谱面积与535 nm到420 nm区间内的荧光光谱面积之间的比值<sup>[25]</sup>。油包裹体

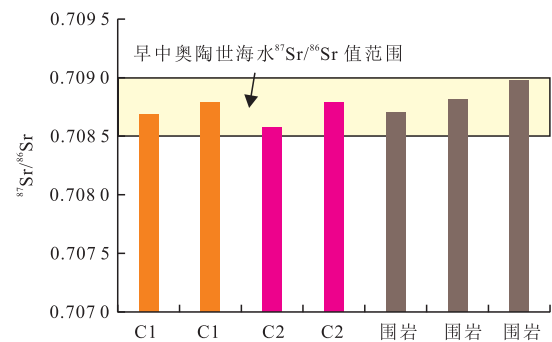
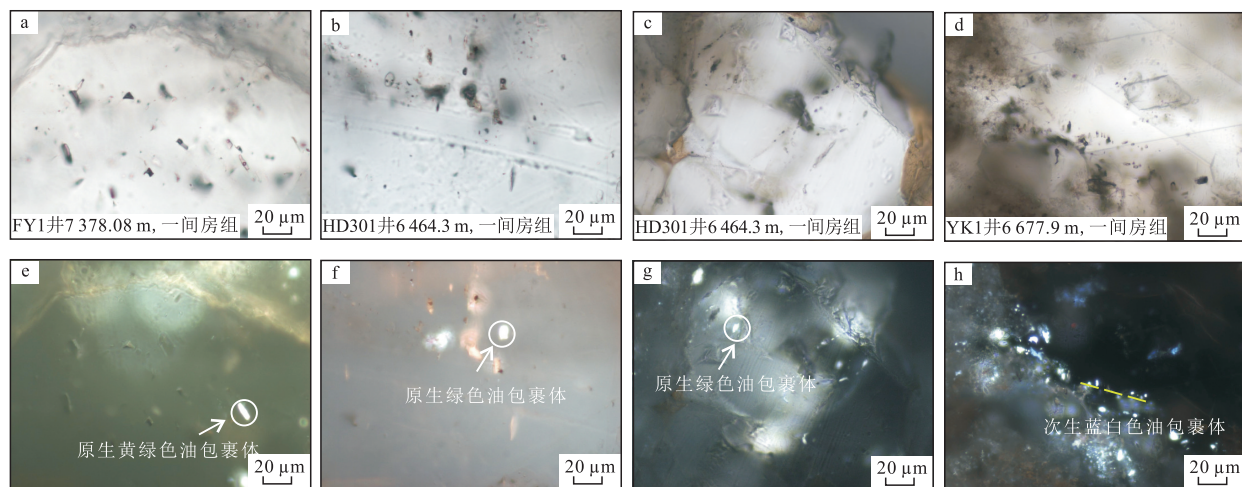


图4 塔里木盆地富满油田北部奥陶系储层方解石Sr同位素特征

Fig. 4 Sr isotope characteristics of calcite from Ordovician reservoirs in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

的成熟度会随着其小分子含量的增加而变大,此时主峰波长 $\lambda_{\text{max}}$ 和 $Q_{\text{F535}}$ 会逐渐变小。富满油田北部走滑断裂带奥陶系储层方解石中油包裹体荧光颜色共有黄绿色、绿色和蓝白色3种,第一种为黄绿色荧光的原生油包裹体,在单偏光下呈无色—褐色(图5a),多呈孤立或零星状分布于第一期方解石脉体内,大小一般介于5~11  $\mu\text{m}$ ,形状以椭圆状为主, $\lambda_{\text{max}}$ 大部分介于540~548 nm,  $Q_{\text{F535}}$ 值对应应在1.71~1.94,表明包裹体中油的成熟度最低。第二种为绿色荧光的油包裹体,单偏光下呈无色—褐色(图5b、图5c),多呈零星状或团簇状分布于第二期方解石颗粒内,大小一般介于4~9  $\mu\text{m}$ ;少数可达10~14  $\mu\text{m}$ ,形状以水滴状为主, $\lambda_{\text{max}}$ 大部分介于512~534 nm,  $Q_{\text{F535}}$ 值对应应在1.22~1.68,表明包裹体中油的成熟度较低。第三种为蓝白色荧光的次生油包裹体,单偏光下呈无色(图5d),主要分布在第二期方解石裂缝中,以串珠式排列,大小主要集中在3~8  $\mu\text{m}$ ,形状大多为不规则状, $\lambda_{\text{max}}$ 大部分介于495~506 nm,  $Q_{\text{F535}}$ 值对应为1.16~1.44,表



注:a,e为FY1井原生黄绿色油包裹体透射光和对应该荧光照片;b,c为HD301井不同原生绿色油包裹体透射光照片;f,g为HD301井不同原生绿色油包裹体对应的荧光照片;d,h为YK1井次生蓝白色油包裹体透射光和对应该荧光照片。

图5 塔里木盆地富满油田奥陶系油包裹体岩相学照片

Fig. 5 Petrographic photos of Ordovician oil inclusions in Fuman Oilfield, Tarin Basin

明包裹体中油的成熟度最高。通过以上包裹体研究得出,研究区奥陶系储层先后捕获了黄绿色荧光的相对低成熟度的油包裹体,绿色荧光的中等成熟度油包裹体和蓝白色荧光的相对高成熟度油包裹体。

#### 4.2 流体包裹体显微测温

对包裹体的均一温度的测量,首先要满足等容体系、均一体系和封闭体系这3个前提假设,在测量过程中,会出现一些异常的包裹体,如:气液比过大、均一温度异常高的包裹体和卡脖子等<sup>[26]</sup>。在排除不可靠的数据后,对剩下的有效数据进行统计分析。结果如图6所示,FY1井奥陶系储层方解石脉体原生黄绿色油包裹体均一温度集中在56.2~93.4℃,伴生的盐水包裹体均一温度集中在64.2~114.0℃。HD301井样品中,原生绿色油包裹体均一温度集中在63.8~91.2℃,其伴生的盐水包裹体均一温度集中在83.5~118.4℃。YK1井样品中,原生绿色油包裹体均一温度集中在63.5~90.8℃,伴生的盐水包裹体均一温度集中在78.2~103.6℃;次生蓝白色油包裹体均一温度集中在71.3~96.2℃,伴生的盐水包裹体均一温度集中在104.6~119.3℃。

## 5 讨论

### 5.1 流体来源

根据稀土元素配分模式特征本研究认为富满油田北部一间房组储层方解石脉体流体主要为海水来源。在流体中,Eu主要以三价形式出现,但在热液流体环境中,部分三价Eu会还原为二价形式,导致其离子半径变大,Eu在碳酸盐晶格中的迁移变得更加容易,此时稀土元素配

分模式会表现为Eu正异常的特征<sup>[27]</sup>,研究区2期方解石脉体 $\delta\text{Eu}$ 无明显正异常,其值介于0.250~1.501。说明2期方解石脉体都是在低温流体环境中沉淀形成。Ce也被归类为一种能够变价的稀土元素,存在三价和四价这2种价态。Ce的多价态特性对氧化还原环境特别敏感,因此Ce异常是反映氧化还原状态的重要指标,样品中方解石脉 $\delta\text{Ce}$ 表现为明显的正异常,其值介于5.168~6.674,说明2期方解石脉体处于还原环境。由于Sr在海水中的存留时间(约等于1 Ma)大大长于海水的混合时间(约等于1 000 a),因此任何时期的Sr元素都具有统一的同位素特征,海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是随时间而变化的<sup>[28-29]</sup>。富满油田北部地区一间房组的储层基质围岩测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 7~0.708 9)基本位于早中奥陶世海水范围内,由于这些围岩表现出较弱的阴极发光,这表明岩石与周围流体之间发生的水岩反应较弱,未发生同位素的交换。因此,可以通过分析Sr同位素的特征去追踪流体来源。研究区2期方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均分布在塔里木盆地早中奥陶世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.708 5~0.709 0)范围内,其稀土元素配分模式表现为海水来源。此外,方解石脉和围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值大致相同,说明2期方解石脉体均来源于中下奥陶统的海源地层水流体。以上证据表明深层奥陶系油气藏晚期保持了良好的封闭性,是深层油气富集的主要原因之一。

### 5.2 油气成藏时间

目前,确定油气成藏时间的主要手段是流体包裹体的均一温度分析,这一过程涉及测量流体包裹体的均一温度,并将这些数据与研究区的埋藏史结合起来进行投点<sup>[30-31]</sup>。基于这些信息,利用投点算出到达对应温度的

地质历史时期,从而确定油气的充注时期。选取合适的投影温度对于准确判定油气藏形成年代至关重要,因为不同的投影温度会导致不同的成藏时期。关于碳酸盐岩

中捕获的流体包裹体,已有众多研究。在沉积过程中,尤其是当周围地温超过初始封闭温度时,由于内部压力增高,包裹体可能会破裂,并且经历了流体泄漏或者充填等

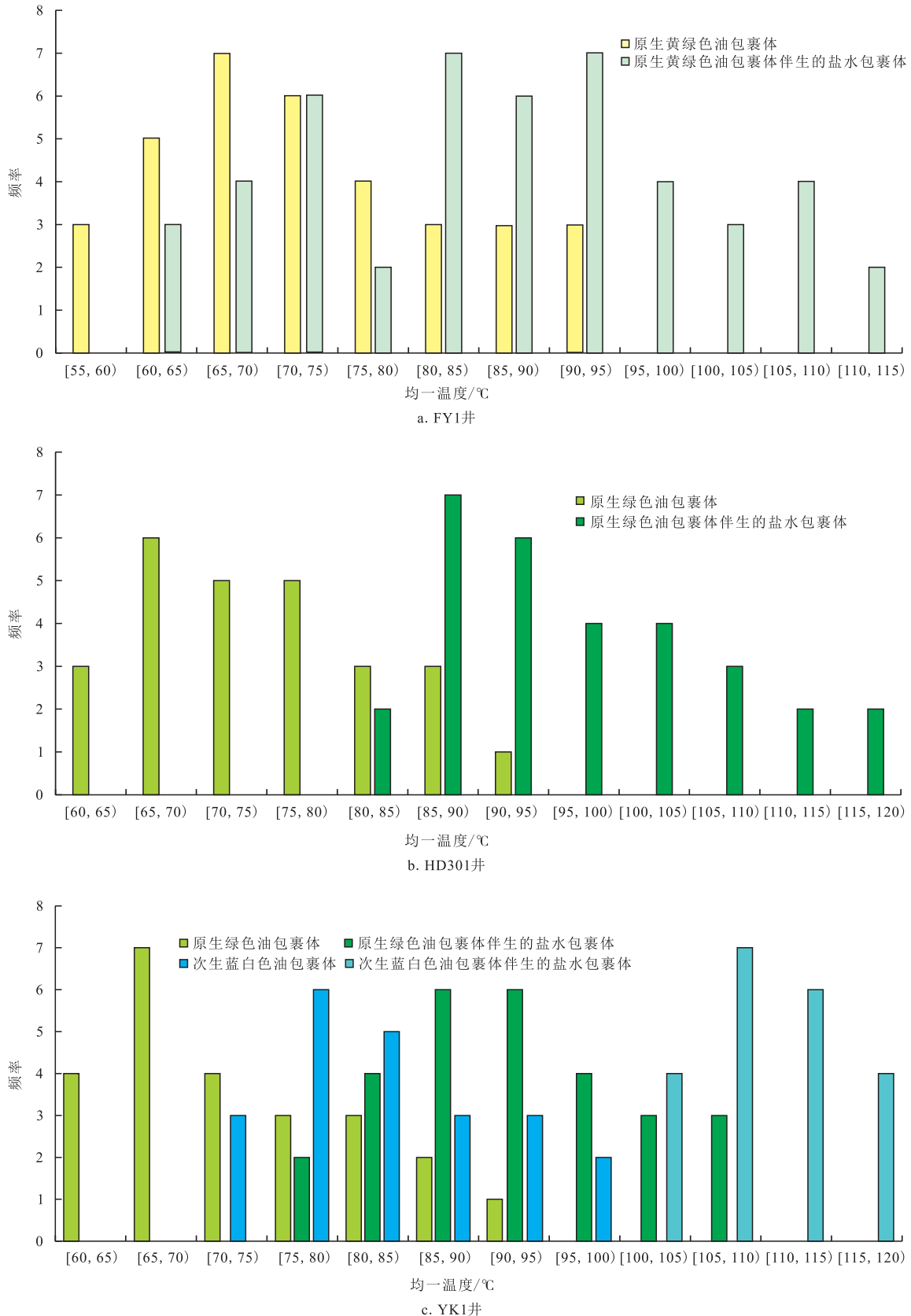


图6 塔里木盆地富满油田北部流体包裹体均一温度统计

Fig. 6 Statistic of homogenization temperature of fluid inclusion in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

热重新平衡过程,使包裹体的均一温度不断上升,最终达到地层所经历的最高古地温。在这些过程中,包裹体的大小、形状和成分等都会影响到包裹体的再平衡。而在经历多次沉积和构造活动的复杂盆地中,这些包裹体更容易受到后期变化的影响。同时,选择包裹体和测量其均一温度都存在一定的误差,这对确定油气充注的时间精度至关重要<sup>[32-34]</sup>。因此,为确保油气充注时间的准确性,选择了伴生盐水包裹体的最低均一温度作为参考点,去更精确地确定油气藏形成的时间。参考点投点结果见图7。黄绿色油包裹体捕获时间为距今452 Ma左右,绿色油包裹体捕获时间为距今364 Ma左右,蓝白色油包裹体捕获时间为距今279 Ma左右。由于流体包裹体的均一温度间接定年在确定油气藏形成年代方面存在多种可能解释,采用方解石的U-Pb同位素定年法能够帮助解决这一不确定性。原理是方解石中原生油包裹体的捕获时间和其脉体的形成时间是一致的。通过激光原位U-Pb同位素定年确定FY1井样品中发育原生油包裹体的方解石脉的形成年龄为(459±7.2) Ma(图8a),HD301井样品中发育原生油包裹体的方解石脉的形成年龄为(348±18) Ma(图8b)。通过包裹体间接定年和U-Pb同位素绝对定年所得的结果基本一致,确定了研究区3期油气成藏时间。

### 5.3 油气动态成藏过程

综合前人对塔里木盆地富满油田资料分析认为,研

究区具有良好的生储盖配置,奥陶系碳酸盐岩储层油气主要来自下寒武统的玉尔吐斯组烃源岩,具有较大的生烃潜力,储集空间主要为受断裂破碎作用影响所形成的破碎带以及裂缝和孔洞等,盖层为上奥陶统桑塔木组具有良好封堵性的致密泥灰岩,区内发育的大量走滑断裂和裂缝带是油气垂向运移的重要通道。研究区成藏过程可以概括如下(图9):

加里东中晚期,走滑断裂带开始初步形成(图9a),以垂直走滑运动为主,同时发生段控岩溶,导致形成大量碳酸盐岩缝洞体储集层,此时下寒武统玉尔吐斯组烃源岩达到生烃阶段开始排烃,第一期低成熟度原油沿着断裂垂直向上运移充注进入储层。

海西早期随着部分构造抬升运动,导致最初形成的油藏遭受破坏而残留储层沥青,部分走滑断裂受构造应力作用再次活动形成新的裂缝和孔洞(图9b),此时玉尔吐斯组的烃源岩也总体上达到成熟演化阶段,大量高成熟度的原油沿着活跃的走滑断裂运移至奥陶系储层中聚集成藏。

海西晚期存在油气的补充聚集,断裂的再次活动为深部油气的充注提供了良好的运移通道(图9c),使得储集层中油气更加富集,油气藏规模扩大并保存至今。

综合研究分析,富满油田北部走滑断裂形成于中奥陶世,并经历加里东晚期、海西早期、海西晚期等多期构造活动,形成广泛发育的破碎带,与加里东晚期、海西早

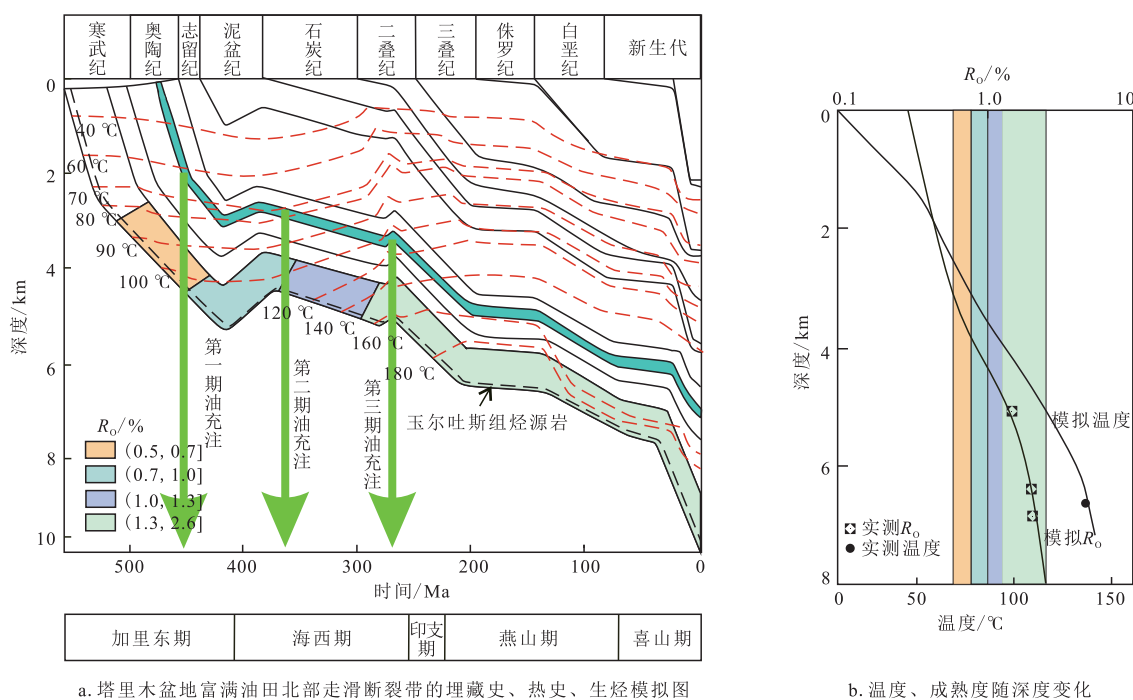


图7 塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带的埋藏史、热史、生烃模拟图及油气充注时间

Fig. 7 Simulation map of burial history, thermal history and hydrocarbon generation and oil and gas filling time of strike-slip fault zone in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

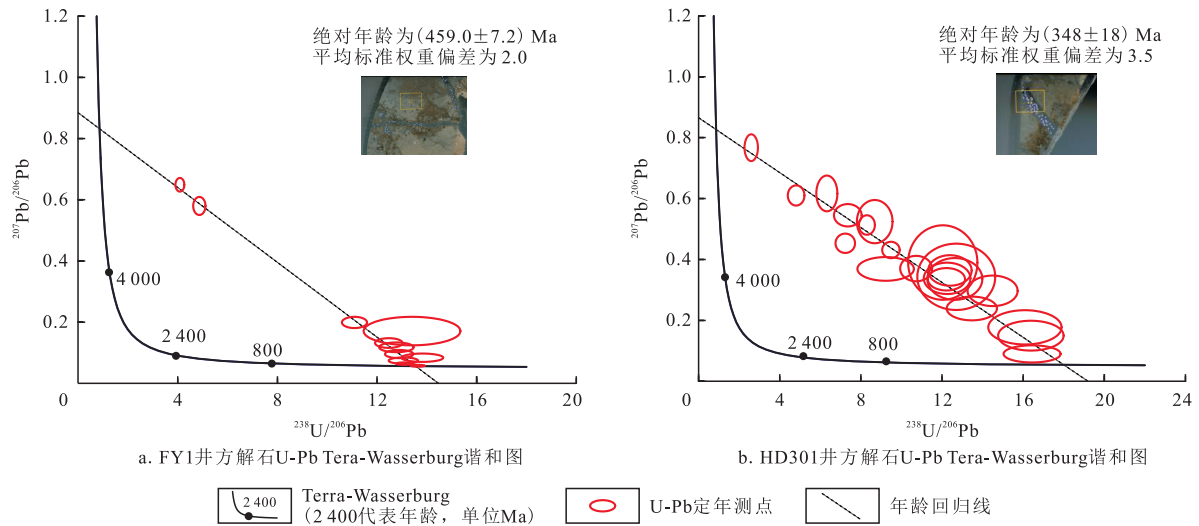


图8 塔里木盆地富满油田北部奥陶系储层方解石U-Pb Tera-Wasserburg谱和图

Fig. 8 U-Pb Tera-Wasserburg concordia diagram of calcite veins in Ordovician reservoirs in strike slip fault zone in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

期、海西晚期的风化壳岩溶及层间岩溶作用时期匹配,有利于大气淡水沿断裂带发生溶蚀作用,形成许多缝洞体储集层;同时位于底部的玉尔吐斯组烃源岩长期演化生烃,区内发育的断裂带为油气运移提供了保障,研究区经历多期油气充注和改造,油气运聚与成藏过程非常复杂。在油气多期成藏与调整过程中,沿断裂带纵向多层段聚集成藏,从而形成走滑断裂控复式成藏系统。富满油田北部经历了加里东晚期、海西早期、海西晚期3期油气充注,海西早期为生成油气的高峰期,这一时期是该地区油气资源形成的关键时期,并为该地区的油气资源奠定了基础。研究区保存了众多海西早期形成的古油藏,并且这些古油藏在演化过程中没有达到热裂解阶段,也没有明显的次生蚀变,因此能够较好地保存下来,这也是能测温到许多80~100℃的伴生盐水包裹体均一温度的原因。以上研究表明:富满油田北部的成藏特征为底部供烃、垂向运移、走滑控聚、多期充注。

## 6 结论

1) 阴极发光结果显示,富满油田北部走滑断裂带奥陶系储层主要发育2期方解石脉。阴极发光颜色为分别暗红色和暗棕色,稀土元素配分模式和Sr同位素特征指示2期脉体都来源于中下奥陶统海源地层水流体,未见氧化性流体侵入,表明深层—超深层油气晚期具有良好的封闭性。

2) 塔里木盆地富满油田北部走滑断裂带深层奥陶系存在3期油气充注过程,第一期对应于距今(459±7.2) Ma,

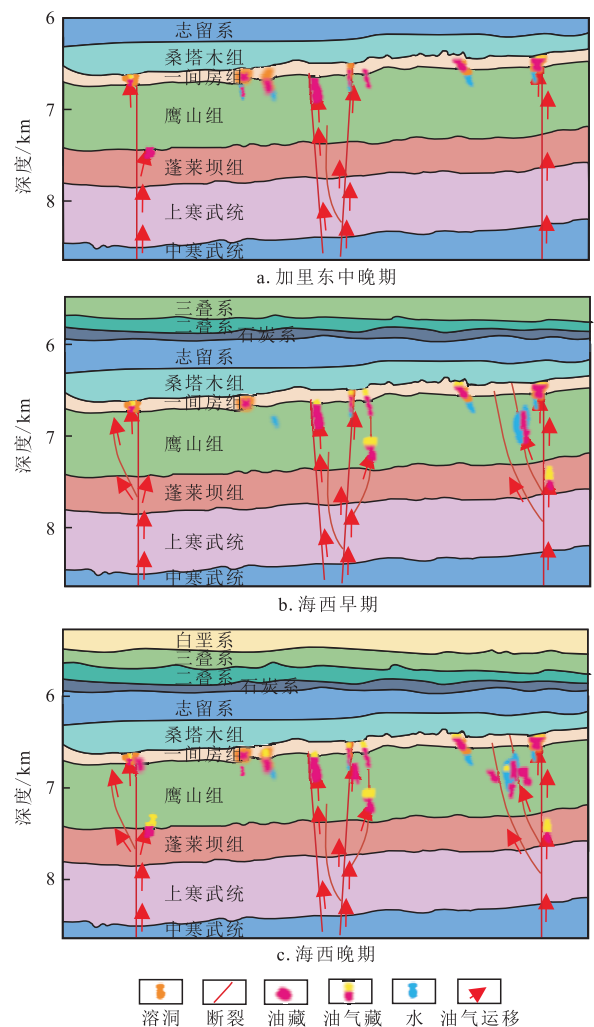


图9 塔里木盆地富满油田北部油气成藏过程  
Fig. 9 Hydrocarbon accumulation process in northern Fuman Oilfield, Tarim Basin

此时储层捕获了成熟度较低的原生黄绿色油包裹体;第二期对应于距今(348±18) Ma,储层捕获中等成熟度的原生绿色油包裹体;第三期对应于距今约268 Ma,储层捕获成熟度较高的次生蓝白色油包裹体。

#### 参考文献

- [1] 杨率, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地北部地区超深断控油藏关键成藏期[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 249-261.  
YANG Shuai, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Key oil accumulation periods of ultra-deep fault-controlled oil reservoir in northern Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 249-261.
- [2] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17-28.  
YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 17-28.
- [3] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 971-985.  
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 42(8): 971-985.
- [4] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335-349.  
SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335-349.
- [5] 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 47-58.  
WANG Qinghua, YANG Haijun, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 47-58.
- [6] 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等. 走滑断裂对碳酸盐岩储层和油气藏的控制作用——以塔里木盆地北部坳陷为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 10-20.  
WANG Rujun, WANG Xuan, DENG Xingliang, et al. Control effect of strike-slip faults on carbonate reservoirs and hydrocarbon accumulation: A case study of the northern depression in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 10-20.
- [7] 汪洋, 张哨楠, 刘永立. 塔里木盆地塔河油田走滑断裂活动对油气成藏的控制作用——以托甫39断裂带为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 394-401.  
WANG Yang, ZHANG Shaonan, LIU Yongli. Controls of strike-slip fault activities on hydrocarbon accumulation in Tahe Oilfield, Tarim Basin: A case study of TP 39 fault zone[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 394-401.
- [8] 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.
- [9] 桂丽黎, 卓勤功, 鲁雪松, 等. 基于原位方解石 U-Pb 定年与包裹体分析技术恢复储集层成岩-成藏过程——以准噶尔盆地南缘高泉地区白垩系清水河组为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1209-1220.  
GUI Lili, ZHUO Qingong, LU Xuesong, et al. Restoration of reservoir diagenesis and hydrocarbon accumulation process by calcite in-situ U-Pb dating and fluid inclusion analysis: A case study on Cretaceous Qingshuihe Formation in Gaoquan, southern Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1209-1220.
- [10] 鲁雪松, 桂丽黎, 陈玮岩, 等. 激光原位碳酸盐岩 U-Pb 定年实验方法改进与石油地质应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 2953-2968.  
LU Xuesong, GUI Lili, CHEN Weiyan, et al. Improvement of in situ LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2023, 53(12): 2953-2968.
- [11] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 207-221.  
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 207-221.
- [12] 田方磊, 何登发, 陈横俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带北—中段构造特征与多期构造叠加演化时空序列[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2117-2135.  
TIAN Fanglei, HE Dengfa, CHEN Jiajun, et al. Northern and Central Segments of Shunbei No. 5 Strike-Slip Fault Zone in Tarim Basin: Structural Characteristics and Spatio-Temporal Evolution Process[J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2117-2135.
- [13] 邬光辉, 陈鑫, 马兵山, 等. 塔里木盆地晚新元古代—早古生代板块构造环境及其构造-沉积响应[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2431-2441.  
WU Guanghui, CHEN Xin, MA Binshan, et al. The tectonic environments of the Late Neoproterozoic-Early Paleozoic and its tectono-sedimentary response in the Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(8): 2431-2441.
- [14] 刘强, 张银涛, 陈石, 等. 塔里木盆地走滑断裂发育演化特征精细解析及其地质意义: 以富满油田 F<sub>I</sub> 17 断裂为例[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1-17.  
LIU Qiang, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its geological significance: A case study of F<sub>I</sub> 17 Fault in Fuman Oilfield[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1-17.
- [15] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田 F<sub>I</sub> 16 断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99-109.  
SONG Xingguo, CHEN Shi, YANG Minghui, et al. Development characteristics of F<sub>I</sub> 16 fault in Fuman oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 99-109.
- [16] 王清华. 塔里木盆地17号走滑断裂带北段差异变形与演化特征[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1136-1145.  
WANG Qinghua. Differential deformation and evolution characteristics of the No. 17 strike-slip fault zone in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1136-1145.
- [17] 韦东晓, 沈安江, 王莹, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞充填方解石的阴极发光特征及对成岩环境的指示意义[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 54-58.  
WEI Dongxiao, SHEN Anjiang, WANG Ying, et al. Cathodoluminescence

- features of the calcite filling in the Ordovician carbonate fractured-vegy reservoir and its significance to instructions of diagenetic environment in Northern Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 54-58.
- [18] 邓宾, 吴娟, 李文正, 等. 烃类包裹体赋存碳酸盐矿物 U-Pb 定年及其在油气成藏期次研究中的应用——以川中震旦系灯影组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(11): 1887-1898.
- DENG Bin, WU Juan, LI Wenzheng, et al. U-Pb dating and trapped hydrocarbon inclusions in carbonate for petroleum accumulation: Case study from the Sinian Dengying Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(11): 1887-1898.
- [19] HUANG Y H, LUO T, TAO Z, et al. Fluid evolution and petroleum accumulation in the precambrian gas reservoirs of the Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 150(7-8): 106171.
- [20] HUANG Y H, HE S, GUO X W, et al. Pressure-temperature-time-composition (p-t-t-x) of paleo-fluid in permian organic-rich shale of lower yangtze platform, china: Insights from fluid inclusions in fracture cements[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 126(79): 104936.
- [21] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 810-818.
- HU Wenxuan, CHEN Qi, WANG Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 810-818.
- [22] 高键, 李慧莉, 何治亮, 等. 川东南平桥地区寒武系洗象池群多元复合成藏过程及其勘探启示[J]. *地质前缘*, 2023, 30(6): 263-276.
- GAO Jian, LI Huili, HE Zhiliang, et al. Multi-stage hydrocarbon accumulation in Cambrian Xixiangchi Group, Pingqiao area, southeastern Sichuan and its implications for hydrocarbon exploration [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 263-276.
- [23] 刘秀岩, 陈红汉, 肖雪薇, 等. 页岩气成气过程的流体包裹体证据——以重庆秀山剖面下寒武统牛蹄塘组为例[J]. *地质前缘*, 2023, 30(3): 165-180.
- LIU Xiuyan, CHEN Honghan, XIAO Xuewei, et al. Characterization of the shale gas formation process based on fluid in-clusion evidence: An example of the Lower Cambrian Niutitang shale formation, Xiushan section, southeastern Chongqing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 165-180.
- [24] 高键, 李慧莉, 何治亮, 等. 渝东彭水地区常压页岩气压力演化与富集保存[J]. *天然气工业*, 2022, 42(8): 124-135.
- GAO Jian, LI Huili, HE Zhiliang, et al. Pressure evolution, enrichment and preservation of normal-pressure shale gas in the Pengshui area of eastern Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(8): 124-135.
- [25] 陈家旭, 王斌, 郭小文, 等. 应用方解石激光原位 U-Pb 同位素定年确定多旋回叠合盆地油气成藏绝对时间——以塔里木盆地塔河油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1365-1375.
- CHEN Jiayu, WANG Bin, GUO Xiaowen, et al. Application of laser in-situ U-Pb dating of calcite to determination of the absolute time of hydrocarbon accumulation in polycyclic superimposed basins: A case study on Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1365-1375.
- [26] 尤兵, 倪智勇, 王学军, 等. 东营凹陷沙河街组三段储层流体包裹体特征与油气成藏期次[J]. *地球化学*, 2020, 49(4): 450-463.
- YOU Bing, NI Zhiyong, WANG Xuejun, et al. Characteristics of fluid inclusions and the hydrocarbon accumulation period in the reservoir of the third member of the Shahejie Formation in the Dongying Depression[J]. *Geochimica*, 2020, 49(4): 450-463.
- [27] 赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(1): 141-167.
- ZHAO Yanyan, LI Sanzhong, LI Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(1): 141-167.
- [28] 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(1): 1-7.
- HUANG Sijing, LIU Shugen, LI Guorong, et al. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(1): 1-7.
- [29] 王东, 王国芝, 刘树根, 等. 塔东地区英东2井寒武系-奥陶系储层流体地球化学示踪[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 867-876.
- WANG Dong, WANG Guozhi, LIU Shugen, et al. Geochemical tracing of the Cambrian-Ordovician reservoir fluid in Well Yingdong-2, eastern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 867-876.
- [30] 陈睿倩, 柳广弟, 孙明亮, 等. 冀北拗陷中元古界流体包裹体与油气成藏期次研究[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(1): 64-72.
- CHEN Ruiqian, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Fluid inclusions and hydrocarbon accumulation stages of mesoproterozoic reservoirs in the Jibei Depression[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(1): 64-72.
- [31] 徐豪, 郭小文, 曹自成, 等. 运用方解石中流体包裹体最小均一温度确定塔河油田奥陶系油气成藏时间: 来自激光原位方解石 U-Pb 年龄的证据[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3535-3548.
- XU Hao, GUO Xiaowen, CAO Zicheng, et al. Application of minimum homogenization temperatures of aqueous inclusions in calcite veins to determine time of hydrocarbon accumulation in ordovician of Tahe Oilfield: Evidence from in-situ calcite U-Pb dating by laser ablation[J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3535-3548.
- [32] 郭小文, 陈家旭, 袁圣强, 等. 含油气盆地激光原位方解石 U-Pb 年龄对油气成藏年代的约束——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 284-291.
- GUO Xiaowen, CHEN Jiayu, YUAN Shengqiang, et al. Constraint of in-situ calcite U-Pb dating by laser ablation on geochronology of hydrocarbon accumulation in petroliferous basins: A case study of Dongying sag in the Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 284-291.
- [33] 李斌, 张欣, 郭强, 等. 塔里木盆地寒武系超深层含油气系统盆地模拟[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 804-815.
- LI Bin, ZHANG Xin, GUO Qiang, et al. Basin modeling of Cambrian ultra-deep petroleum system in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 804-815.
- [34] 王斌, 杨毅, 曹自成, 等. 塔河油田中下奥陶统储层裂缝方解石脉 U-Pb 同位素年龄及油气地质意义[J]. *地球科学*, 2021, 46(9): 3203-3216.
- WANG Bin, YANG Yi, CAO Zicheng, et al. U-Pb dating of calcite veins developed in the middle-lower ordovician reservoirs in Tahe Oilfield and its petroleum geologic significance in Tahe Oilfield[J]. *Earth Science*, 2021, 46(9): 3203-3216.