

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.026



塔中北坡顺托果勒地区志留系油气成藏期差异性分析

王倩茹^{1,2}, 陈红汉^{1,2*}, 赵玉涛³, 唐大卿^{1,2}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138001

摘要:塔中顺托果勒地区经历了多期构造活动,使顺10和顺9井区油气成藏过程具有一定的差异性。前人采用多种技术方法对研究区志留系成藏时期进行了深入研究,但尚未达成共识。以储层成岩作用和成岩序次分析为基础,采用显微红外光谱、显微荧光、冷阴极光等手段,对储层沥青、原油和单个油包裹体进行了系统分析,并结合埋藏史投影法确定了研究区志留系柯坪塔格组顺10和顺9井区等油气充注序次和成藏时间。结果表明,顺9井区存在3期油和1期天然气充注,加里东晚期(419.6~398.1 Ma)、海西晚期(271.5~224.0 Ma)和喜山期(11.4~1.1 Ma);顺10井区可能只存在加里东晚期(419.6~408.4 Ma)和海西晚期(271.6~236.8 Ma)油充注,缺乏晚期油气充注。顺9井区3D地震剖面层位和断裂解释显示,塔中北坡NE向走滑断裂是志留系油气运移的重要输导体系,并控制了柯坪塔格组晚期油气充注,决定了该区工业油流。因此,塔中北坡志留系油气勘探的关键是寻找喜山期充注的油气藏。

关键词:志留系;显微红外光谱;流体包裹体;沥青;塔里木盆地;石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2018)02-0577-17

收稿日期: 2017-08-16

Differences of Hydrocarbon Accumulation Periods in Silurian of Tazhong Northern Slope, Tarim Basin

Wang Qianru^{1,2}, Chen Honghan^{1,2*}, Zhao Yutao³, Tang Daqing^{1,2}

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Jilin Oilfield Exploitation Research Institute, PetroChina, Songyuan 138001, China

Abstract: Hydrocarbon accumulations of Silurian had obvious differences between shun 10 and shun 9 well blocks due to the influence of multi-cycle tectonic activity in Shuntuoguole area of Tarim basin. Researchers used a variety of technical methods to conduct an in-depth study of the Silurian accumulation period in the study area, but no consensus has yet been reached. On the basis of diagenesis and diagenetic sequences, hydrocarbon filling sequence and charging history in shun 10 and shun 9 well blocks are determined by fluid inclusion system analysis and burial history projection combined with micro FT-IR, microscopic fluorescence and cathodeluminescence analysis in this study. Results show that the shun 9 well block displays three oil-charging stages including Late Caledonian (419.6–398.1 Ma), Late Hercynian (271.5–224.0 Ma) and the Himalayan (11.4–1.1 Ma), while shun 10 well block displays only two oil-charging stages including Late Caledonian (419.6–408.4 Ma) and Late Hercynian (271.6–236.8 Ma). 3D seismic interpretation of strata section and faults in shun 9 well block shows that, NE strike-slip faults in Tazhong northern slope are important migration system for hydrocarbon migration in the Silurian, which determines the industrial oil output in this area. Hence, the key target for hydrocarbon exploration in the Silurian lies in reservoirs charged

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(No.2012CB214804);中石化西北油田分公司勘探开发研究院协作项目(No.KY2012-3-063)。

作者简介:王倩茹(1989-),女,博士研究生,主要从事油气成藏机理研究。ORCID:0000-0002-7272-2139.E-mail:qrwang@126.com

* **通讯作者:**陈红汉,ORCID:0000-0001-6968-412X.E-mail:hhchen@cug.edu.cn

引用格式:王倩茹,陈红汉,赵玉涛,等,2018.塔中北坡顺托果勒地区志留系油气成藏期差异性分析.地球科学,43(2):577-593.

in the Himalayan.

Key words: Silurian; micro FT-IR; fluid inclusion; bitumen; Tarim basin; petroleum geology.

0 引言

红外光谱分析技术是运用红外光照射有机质,使有机物质分子内振动和转动能级跃迁而产生的吸收光谱,通过解析红外光谱可以得到物质的结构信息(翁诗甫,2010).20世纪50年代,红外光谱首次用于沉积有机质结构研究,但由于信噪比较低,一直未得以广泛应用.直到20世纪80年代,随着傅里叶变换红外光谱技术的迅速发展,红外光谱的信噪比不断提高而被广泛应用于煤(Odeh,2015; Okolo *et al.*,2015; Qin *et al.*,2015)和干酪根(Ganz and Kalkreuth,1987; Lis *et al.*,2005; Alstadt *et al.*,2012)的化学组成与结构的研究.配有显微镜的傅里叶变换红外光谱仪可以观测到样品的微观形态,实现某些特殊样品的微区分析,如单个油包裹体(Pironon and Barres,1990; Pironon *et al.*,2000; Ferket *et al.*,2011; 王倩茹等,2016)和储层粒间孔或晶间孔中的沥青等.通过计算样品红外光谱吸收峰面积和傅里叶变换显微红外光谱分析,可以定量得到样品中不同基团的相对含量(鲁雪松等,2012; 李峰等,2016).因此,在单个油包裹体、原油和储层微区沥青等成熟度和成藏期次研究中,傅里叶变换显微

红外光谱具有独特的优势而成为油气成藏研究的一种新手段.

塔中北坡顺托果勒地区受到塔里木盆地多旋回复杂构造活动的影响,油气经历了多期调整和改造.前人采用多种技术方法对塔中地区志留系成藏时期进行了深入研究,但尚未达成共识.张有瑜等(张有瑜等,2007; Zhang *et al.*,2011; 张有瑜和罗修泉,2012)通过自生伊利石 K-Ar 测年和粘土矿物 X 射线衍射技术分析认为,塔中隆起志留系主要为晚加里东一早海西期和晚海西期成藏;而吕修祥等(2008)综合烃源岩热演化史、流体包裹体分析及连续抽提组分地球化学参数认为,塔中地区经历了加里东晚期、海西晚期和燕山—喜山期三期油气成藏过程;但是,赵靖舟和李启明(2002)依据包裹体分析、伊利石测年及油气水界面演化史分析认为,塔里木盆地克拉通区海相油气藏具有晚加里东至早海西期、晚海西期和喜山期三期成藏、以及燕山期和喜山期两期调整再成藏的特征.

本文以储层成岩作用研究为基础,结合流体包裹体系统分析和埋藏史投影法确定油气充注年龄,首次综合原油、单个油包裹体和储层沥青显微红外光谱系统分析来揭示顺托果勒地区志留系油气充注

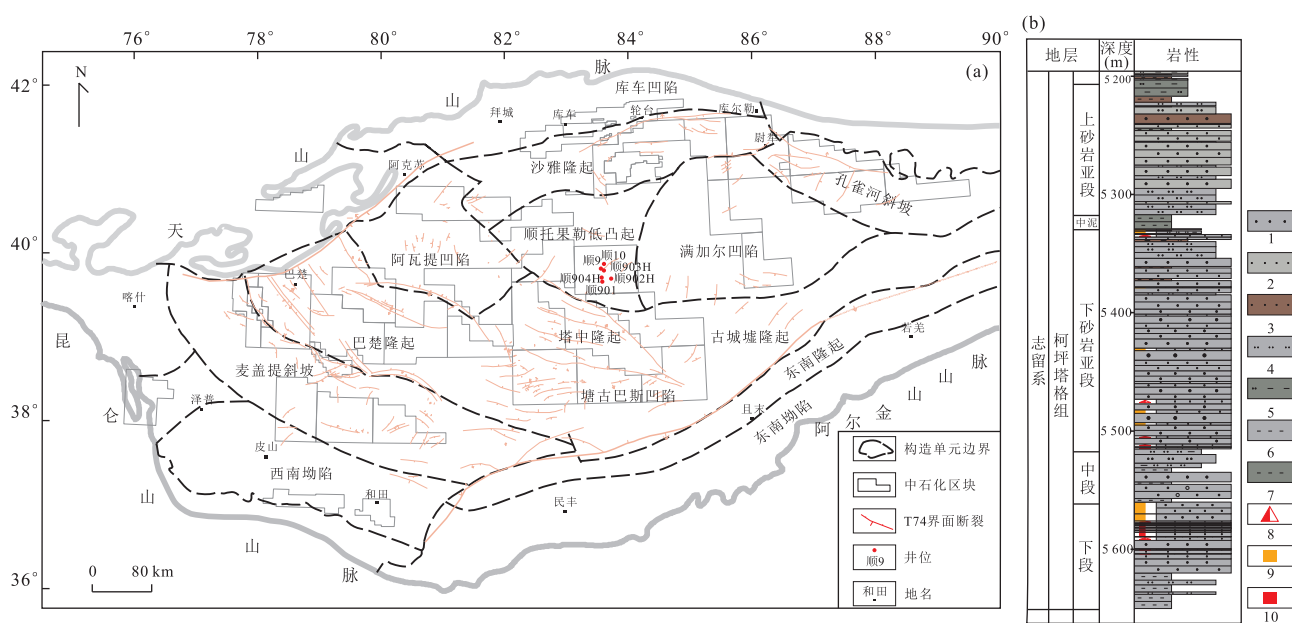


图 1 塔中北坡顺托果勒地区地质概况 (a) 和志留系地层柱状图 (b)

Fig.1 Geological sketch of Shuntuoguole area in Tazhong northern slope (a) and a stratigraphic column of the Silurian strata (b)
1. 灰色中砂岩; 2. 褐灰色细砂岩; 3. 褐色细砂岩; 4. 浅灰色粉砂岩; 5. 棕褐色粉砂质泥岩; 6. 深灰色泥岩; 7. 棕褐色泥岩; 8. 油迹; 9. 含气; 10. 油浸

过程的差异性,指导油气勘探.

1 地质背景

顺托果勒地区位于塔里木盆地中央隆起带北部斜坡区,是在加里东中期形成,并在海西早期、晚期以及印支运动中加强改造的继承性古隆起,西侧为阿瓦提坳陷,东侧与满加尔凹陷紧邻,西南侧与卡塔克隆起相接,东南侧为古城墟隆起,北侧紧邻沙雅隆起(图1),包括寒武统一奥陶统、中上奥陶统两套烃源岩(Huang *et al.*, 2016; 霍志鹏等, 2016).寒武统一奥陶统烃源岩在加里东晚期—海西晚期一直处于排烃阶段,中—上奥陶统烃源岩在燕山晚期—喜山期进入生油高峰阶段.目前顺托果勒区块顺9井已获得工业油流,而顺10井区无可动油.

2 样品和方法

实验测试工作在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成.显微红外测试所用仪器为配有 ThermoFisher Continuum 型红外显微镜的 Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪.荧光观察及光谱采集所用仪器为 Nikon 80I 双通道荧光显微镜,激发波长为 330~380 nm 紫外光线激发器、Ocean Optics Inc.公司的 Maya 2 000 Pro 光谱仪和 Yuanao 显微光谱分析系统.流体包裹体测温所用仪器为 Linkam THMS G600 冷/热台.

研究样品取自塔中北坡顺托果勒地区顺9井、顺901井、顺902H井、顺903H井、顺904H井和顺10井,取样层位为志留系柯坪塔格组(S_{1k}),岩心样品总计112件,采集储层微区沥青显微红外光谱129件、单个油包裹体显微红外光谱47件、原油显微红外光谱3件.

流体包裹体样品双面抛光后,首先进行岩石学

特征观察、荧光分析以及阴极光观察等综合确定其成岩序次,然后在成岩序次约束下对流体包裹体进行显微测温分析,并结合单井埋藏史、热史确定了油气充注期次及时间.单个油包裹体样品选自于荧光观察、红外测试的双面抛光薄片,薄片厚度为0.06~0.09 mm,在透射光和荧光镜下确定包裹体的产状和形态后,将薄片置于酒精或丙酮中浸泡5~8 h,以除去环氧树脂胶.实验取32倍红外显微物镜,为了避免大气中的水和CO₂以及宿主矿物的影响,以空气和宿主矿物作为背景值加以扣除,样品和背景扫描次数设为50次,分辨率为8.000 cm⁻¹,动镜速度为1.8988 cm/s,光阑尺寸设为100.00 μm.原油显微红外光谱采集选取15倍红外显微物镜.储层沥青样品使用专用采样工具获取岩心上新鲜沥青样品后置于溴化钾(KBr)盐片透射池上,在红外显微镜下采集光谱.

3 结果

3.1 原油地球化学特征

塔中北坡志留系柯坪塔格组原油密度为0.86~0.76 g/cm³,为中等—轻质原油.温度为30℃时,粘度为15.31~22.82 mPa·s,均值为18.10 mPa·s;含硫量为0.44%~0.48%,均值为0.46%;凝固点为-34~-28℃,均值为-30℃;含蜡量为2.98%~16.55%,均值为11.86%.因此,该区原油具有低粘度、低含硫、低凝固点、高含蜡等物性特征(马中远等, 2013).

塔中北坡顺9井区柯坪塔格组原油总烃含量高,为77.8%~92.2%;其中,饱和烃为54.8%~76.3%;芳烃为15.9%~25.7%;非烃和沥青质含量低,为7.8%~22.2%;饱芳比相对较高,为2.2~4.8(马中远等, 2013).

顺9井区柯坪塔格组的原油及油砂饱和烃气相

表1 塔中北坡顺9井区原油族组成特征

Table 1 Group composition of crude oil from shun 9 well block, northern slope of middle Tarim basin

| 井号 | 样品类型 | 深度(m) | 层位 | 族组分(%) | | | | | 非烃+沥青质(%) | 饱芳比 |
|--------------------|------|-------------|----------|--------|------|------|------|------|-----------|-----|
| | | | | 饱和烃 | 芳烃 | 总烃 | 非烃 | 沥青质 | | |
| 顺9 ^b | 原油 | 5 560~5 589 | S_{1k} | 76.3 | 15.9 | 92.2 | 4.9 | 2.9 | 7.8 | 4.8 |
| 顺9 ^b | 油砂 | 5 587 | S_{1k} | 63.4 | 16.7 | 80.1 | 9.7 | 10.2 | 19.9 | 3.8 |
| 顺901 ^b | 油砂 | 5 500 | S_{1k} | 57.4 | 25.7 | 83.0 | 9.1 | 7.9 | 16.9 | 2.2 |
| 顺902H ^a | 油砂 | 5 517.1 | S_{1k} | 54.8 | 23.0 | 77.8 | 11.2 | 11.1 | 22.2 | 2.4 |
| 顺904H ^a | 油砂 | 5 568.1 | S_{1k} | 61.2 | 21.0 | 82.2 | 11.0 | 6.8 | 17.8 | 2.9 |

注:a表示数据来自马中远等(2013),b表示数据来自项目报告《塔里木盆地重点探区油气成藏地球化学研究》,中石化西北油田分公司,2012.

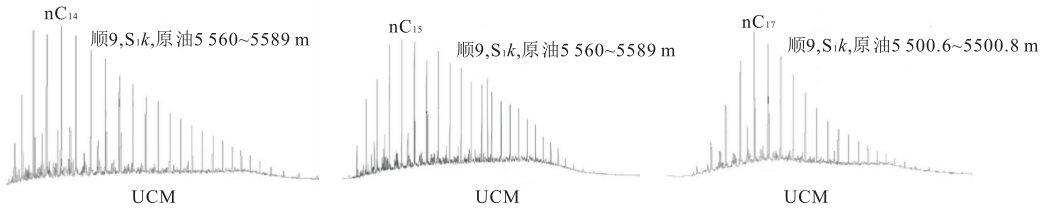


图 2 塔中北坡原油饱和烃色谱图

Fig.2 Gas chromatograms of saturated hydrocarbon fraction of crude oil in northern slope of middle Tarim basin
据项目报告《塔里木盆地重点探区油气成藏地球化学研究》，中石化西北油田分公司，2012

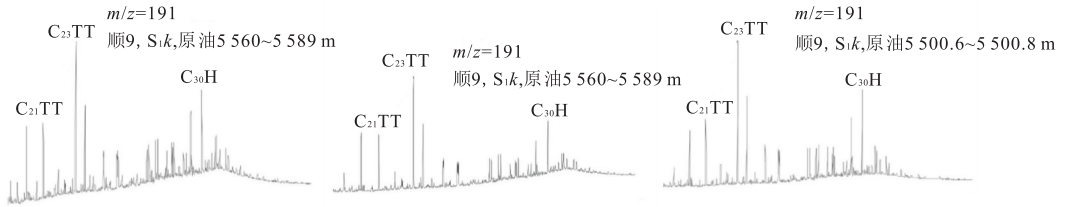


图 3 塔中北坡原油 m/z 191 质量色谱图

Fig.3 Mass chromatograms (m/z 191) of crude oils in northern slope of middle Tarim basin

据项目报告《塔里木盆地重点探区油气成藏地球化学研究》，中石化西北油田分公司，2012; C₂₁ TT, C₂₃ TT=C₂₁, C₂₃ tricyclic terpanes, C₃₀ H=C₃₀ hopane

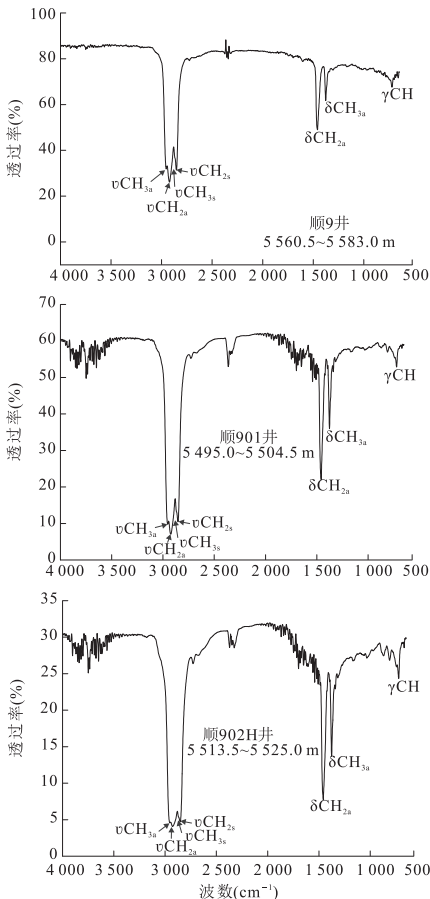


图 4 顺 9 井区原油显微红外光谱特征

Fig.4 Micro FT-IR spectra characteristics of crude oils in shun 9 well block

色谱图中基线均呈现轻微“鼓包”(UCM 峰),但正构烷烃系列均较完整(图 2),说明遭受生物降解的原油中有未遭受生物降解原油的注入,也证实志留系柯坪塔格组存在多期油气充注.此外,原油 m/z 191 质量色谱图中三环萜烷系列的丰度明显高于藿烷系列(图 2),结合马中远等(2013)对该井区原油成熟度的分析及饱和烃气相色谱图中出现的轻微“鼓包”,笔者认为该区原油遭受了一定程度的生物降解作用.

原油的显微红外光谱中检测到大量饱和烃(包括直链烷烃和环烷烃)和芳香烃吸收峰(图 4).饱和烃 CH_3 非对称伸缩振动(νCH_{3a}) ($2960 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$)和 CH_2 非对称伸缩振动(νCH_{2a}) ($2925 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$)、 CH_3 对称伸缩振动(νCH_{3s}) ($2875 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$)和 CH_2 对称伸缩振动(νCH_{2s}) ($2855 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$)都属于强吸收峰,且两峰分离较差,易叠加.吸收峰 $1460 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1375 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ 分别为 CH_3 不对称弯曲振动(δCH_{3a})、对称弯曲振动(δCH_{3s}), $1465 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$ 为烷烃 CH_2 弯曲振动(δCH_{2a}).碳链中 C-C 骨架振动吸收峰一般位于 $700 \sim 720 \text{ cm}^{-1}$ 处,芳烃 CH 面外弯曲振动(γCH)一般位于 $730 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$.

3.2 流体包裹体测试

3.2.1 岩相学观察和成岩作用 顺托果勒地区志留系柯坪塔格组成岩作用包括机械压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用等.因柯坪塔格组埋深较

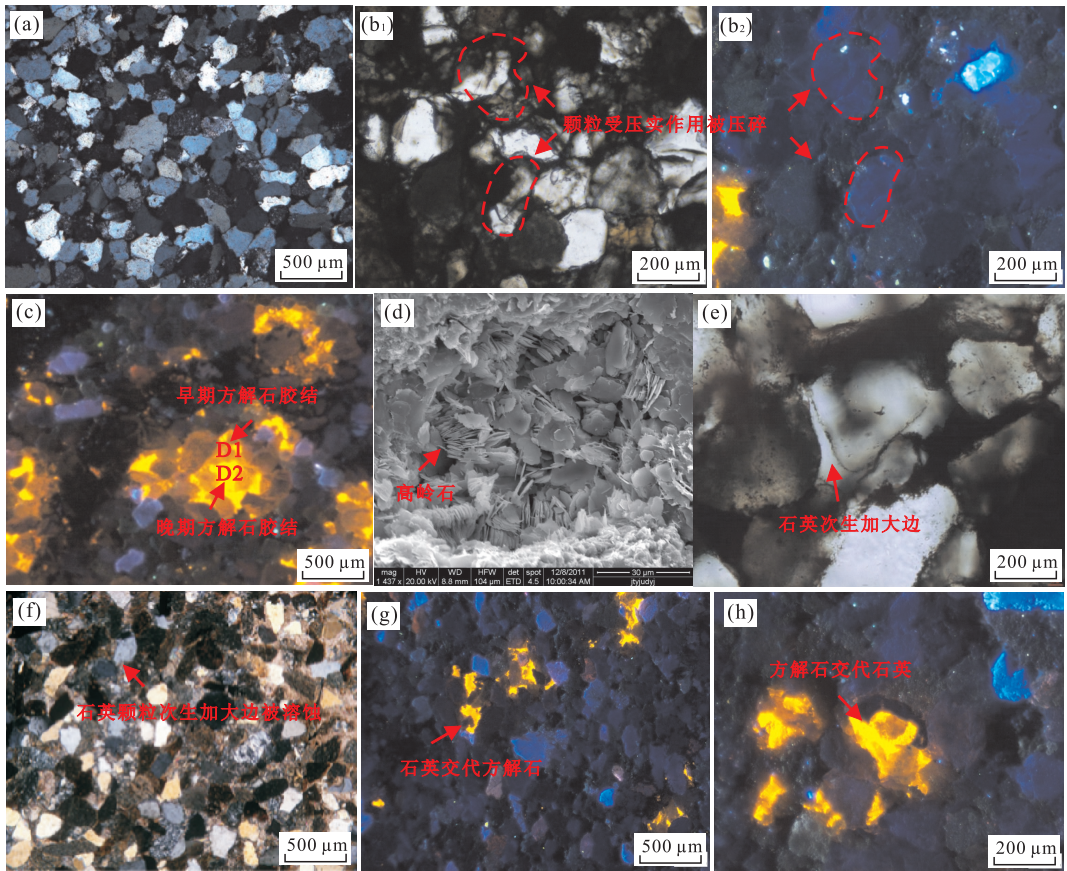


图 5 顺托果勒地区柯坪塔格组成岩作用特征

Fig.5 Diagenesis characteristics of Kepingtage Formation in Shuntuoguole

a.顺 904H 井,5 371.73 m,正交光,×5;b₁.顺 901 井,5 297.8~5 297.9 m,透射光;b₂.顺 901 井,5 297.8~5 297.9 m,阴极光;c.顺 903H 井,5 346.5 m,阴极光;d.顺 901 井,5 500.75 m,扫描电镜;e.顺 901 井,5 296.92 m,透射光;f.顺 901 井,5 295.05 m,正交光,×5;g.顺 903H 井,5 574.35~5 574.45 m,阴极光;h.顺 903H 井,5 574.35~5 574.45 m,方解石交代石英

大,沉积物被强烈压实,颗粒之间多为线接触和凹凸接触(图 5a),并且由于压实作用使石英颗粒被压碎(图 5b).胶结作用在柯坪塔格组较为常见,主要有碳酸盐胶结(图 5c)、粘土矿物胶结(图 5d)和硅质胶结(图 5e).本研究区内碳酸盐胶结主要为方解石胶结物,通过阴极光显微镜可辨识早期发橙红色阴极光胶结物(图 5c 中 D1)和晚期桔黄色阴极光胶结物(图 5c 中 D2);早期方解石胶结物被晚期方解石胶结物溶解,悬浮式分布于晚期方解石胶结物中,晚期方解石胶结物呈基底式胶结.镜下观测到石英颗粒次生加大边被溶蚀(图 5f),同时可观测到遭受溶蚀的石英被方解石交代(图 5g)和石英交代方解石(图 5h)等现象.

油包裹体透射光、荧光和阴极光等岩相学观察显示,顺 9 井区油包裹体及与其伴生的(含烃)盐水包裹体主要宿主于石英颗粒内裂纹、穿石英颗粒裂纹、石英颗粒次生加大边和方解石胶结物中(图 6),

共检测到四幕油和一幕天然气充注.

笔者在志留系柯坪塔格组检测到早期未穿过石英颗粒次生加大边的石英颗粒内裂纹中油包裹体,该类油包裹体在形成石英颗粒次生加大边之前捕获,其中发蓝绿色荧光成熟度较高的油包裹体可能为早期捕获,发黄绿色荧光油包裹体可能为晚期捕获,结合地质背景分析,认为发蓝绿色荧光油包裹体可能为加里东晚期充注的油被捕获的包裹体,由于海西早期的构造运动使其发生次生变化而形成大范围分布的沥青;另一类发黄绿色荧光油包裹体可能为海西晚期充注的油,油包裹体的均一温度范围多为 50.0~75.0 °C,与油包裹体共生的(含烃)盐水包裹体的均一温度范围为 95.0~110.0 °C,这两类包裹体分别为第一幕和第二幕充注的油.石英颗粒次生加大边中检测到油包裹体,该类油包裹体的发育说明继石英颗粒内裂纹之后第三幕油充注,其中油包裹体的均一温度范围为 80.0~95.0 °C,与油包裹

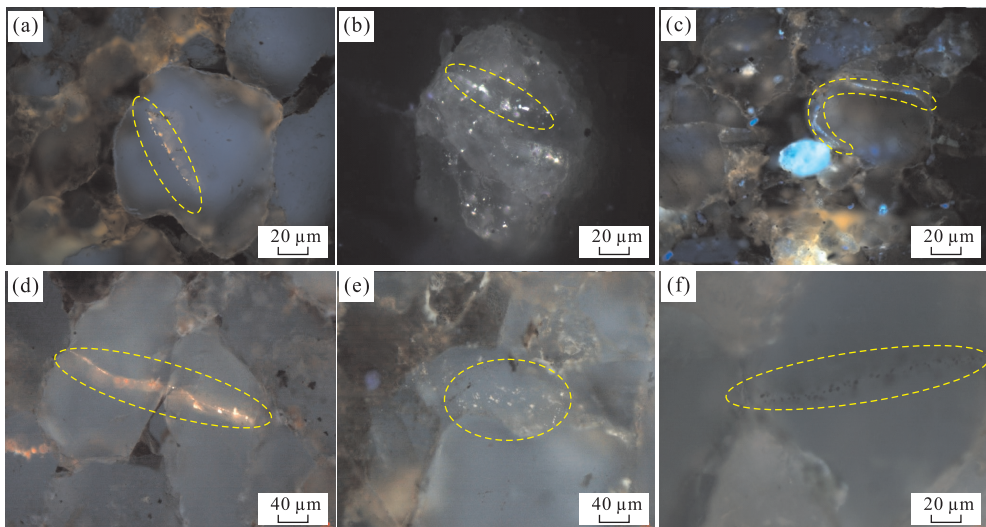


图 6 顺托果勒地区柯坪塔格组油包裹体的典型产状

Fig.6 Fluid inclusion occurrences of Kepingtage Formation in Shuntuoguole

a.顺 901 井,5 301.44 m,石英颗粒内裂纹中发黄绿色荧光油包裹体;b.顺 10 井,5 692.90 m,石英颗粒内裂纹中发蓝绿色荧光油包裹体;c.顺 903H 井,5 346.50 m,石英颗粒次生加大边中发蓝色荧光油包裹体;d.顺 904H 井,5 369.06 m,穿石英颗粒裂纹中发橙色荧光油包裹体;e.顺 901 井,5 497.00 m,方解石胶结物中发蓝绿色荧光油包裹体;f.顺 901 井,5 499.66 m,穿石英颗粒裂纹不发荧光纯气相天然气包裹体

表 2 顺托果勒地区柯坪塔格组包裹体显微测温数据

Table 2 Homogenization temperatures of fluid inclusions in Kepingtage Formation of Shuntuoguole

| 井区 | 充注幕次 | 油包裹体均一温度(°C) | 同期盐水包裹体(°C) |
|------|------|--------------|-------------|
| 顺 9 | 第一幕 | 10.3~38.5 | 41.2~68.4 |
| | 第二幕 | 49.2~78.0 | 73.0~109.8 |
| | 第三幕 | 75.3~99.4 | 100.5~118.5 |
| | 第四幕 | 96.3~124.1 | 115.9~142.1 |
| | 第四幕 | 纯气相包裹体 | 126.1~136.5 |
| 顺 10 | 第一幕 | 14.4~19.8 | 38.5~70.6 |
| | 第二幕 | 56.7~75.3 | 98.6~110.9 |
| | 第三幕 | 74.6~93.9 | 102.0~115.7 |

体伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度范围为 100.0~115.0 °C.此外检测到一幕穿石英颗粒裂纹中的油包裹体,此类石英裂纹与石英颗粒次生加大边和方解石胶结物无交切关系,其油包裹体均一温度为 75.0~95.0 °C,与油包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度为 100.0~115.0 °C,笔者通过均一温度推断其可能与石英颗粒次生加大边同时形成,均为第三幕油充注的结果.柯坪塔格组存在两期方解石胶结,油包裹体发育在发桔黄色阴极光的方解石胶结物中,亦即晚期方解石胶结物,油包裹体均一温度约为 120 °C,与油包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体的均一温度多为 110.0~125.0 °C,也为第四幕油充注被捕获的结果.穿石英颗粒裂纹检测到油包裹体,该类在石英裂纹中的油包裹体均穿过石英颗

粒次生加大边,说明石英裂纹在石英颗粒次生加大边之后形成,油包裹体的均一温度范围为 95.0~110.0 °C,与油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度范围为 115.0~135.0 °C,没有检测到该产状发育的油包裹体和晚期方解石胶结物中的油包裹体的交切关系,笔者通过盐水包裹体的均一温度推测穿石英颗粒裂纹(穿过加大边)和晚期方解石胶结物中的油包裹体均为第四幕油充注被捕获的结果.此外,笔者在穿石英颗粒裂纹中检测到一幕不发荧光的天然气包裹体,与天然气包裹体伴生的盐水包裹体均一温度多在 125.0 °C 以上.综合油包裹体产状、油包裹体及其伴生盐水包裹体均一温度可知,其成岩序次为石英颗粒内裂纹→石英颗粒次生加大边/穿石英颗粒裂纹→晚期方解石胶结物/穿石英颗粒裂纹.

但是,顺 10 井未检测到穿过石英颗粒次生加大边的穿石英颗粒裂纹和方解石胶结物中的油包裹体,只在石英颗粒内裂纹、石英颗粒次生加大边和穿石英颗粒裂纹中检测到油包裹体,其成岩序次为石英颗粒内裂纹→石英颗粒次生加大边、穿石英颗粒裂纹.因此,顺 10 井缺乏晚期油和天然气充注.

3.2.2 流体包裹体测温 在成岩序次约束下,笔者获取了不同幕次油包裹体和同期盐水包裹体的均一温度.第一幕油包裹体均一温度分布范围为 10.3~38.5 °C,与其伴生的盐水包裹体均一温度范围为 41.2~68.4 °C(表 2);第二幕油包裹体均一温度分布范围为 49.2~78.0 °C,与其伴生的(含烃)盐水包裹体

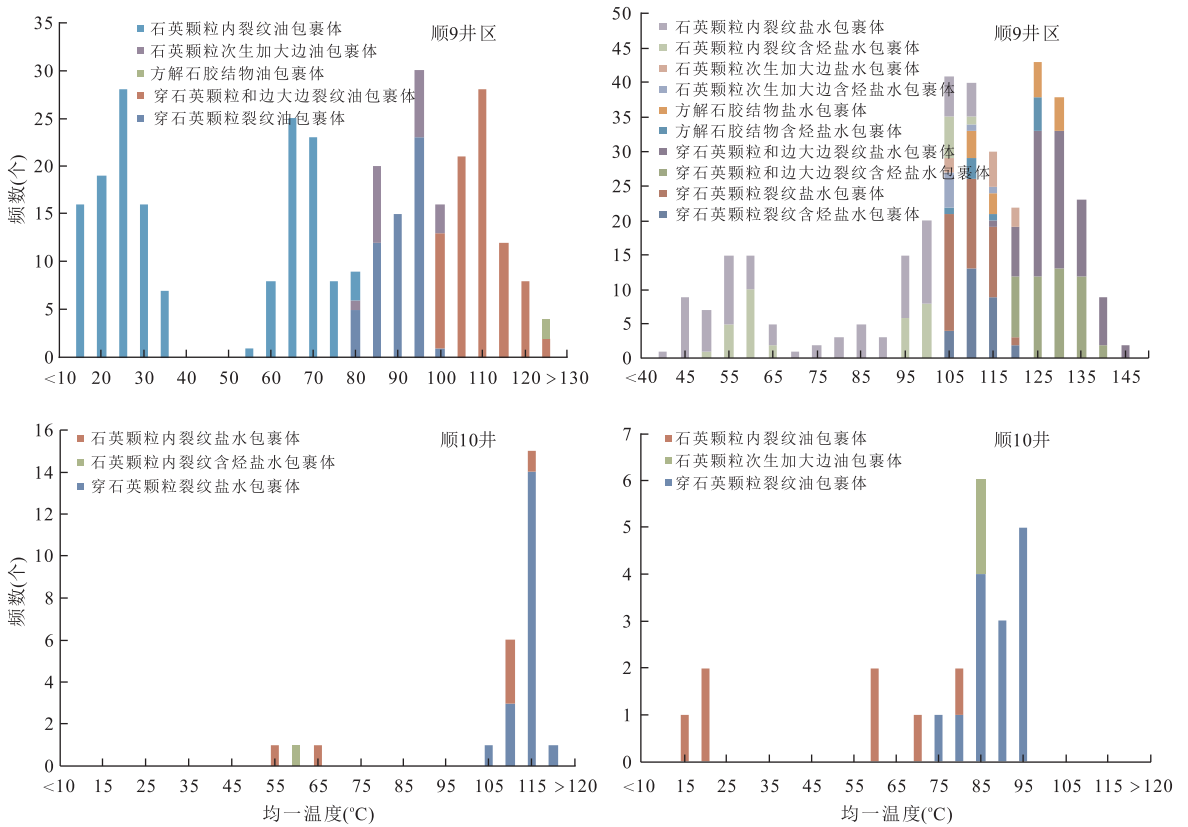


图 7 柯坪塔格组油包裹体和同期盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig.7 Homogenization temperature histogram of oil and coeval aqueous inclusions of Kepingtage Formation

由于加里东晚期—海西早期流体充注的流体来自于奥陶系和寒武系,该期充注的流体具有高温特征,注入志留系的流体温度比志留系自身温度高很多,且该期充注的油主要以高成熟度为主。在有机包裹体的荧光分析中,石英颗粒内裂纹见发蓝绿色荧光高成熟度的油和发黄绿色低成熟度的油,由此笔者推测发蓝绿色荧光油包裹体为加里东晚期—海西早期充注的油被捕获的结果。因此,该幕油包裹体的均一温度和与其伴生盐水包裹体的均一温度均应减去一个差值,根据古地温梯度和深度算出的实际地层温度和测得的盐水包裹体的均一温度(陈红汉等,2017),这个差值 $\Delta T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,文中该期油包裹体和同期盐水包裹体的均一温度均为校正后的结果

均一温度分布范围为 $73.0\sim 109.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,该幕油包裹体和与其伴生的(含烃)盐水包裹体主要在石英颗粒内裂纹检测到;第三幕油包裹体均一温度范围为 $75.3\sim 99.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,与其伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度分布范围为 $100.5\sim 118.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,该幕油包裹体和与其伴生的(含烃)盐水包裹体主要宿主于石英颗粒次生加大边和穿石英颗粒裂纹中,且为同期形成;第四幕油包裹体均一温度分布范围为 $96.3\sim 124.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,与其伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度分布范围为 $115.9\sim 142.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,该幕油包裹体和与其伴生的(含烃)盐水包裹体主要在方解石胶结物、穿过石英颗粒次生加大边的石英颗粒裂纹中检测到;在穿石英颗粒裂纹中检测到与天然气包裹体伴生的(含烃)盐水包裹体,均一温度分布范围为 $126.1\sim 136.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 7)。

顺 10 井区只在石英颗粒内裂纹、石英颗粒次生加大边和穿石英颗粒裂纹中检测到油包裹体,均一温度测试结果表明第一幕油包裹体均一温度范围为

$14.4\sim 19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,与油伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度为 $38.5\sim 70.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 2);第二幕油包裹体的均一温度范围为 $56.7\sim 75.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,与油伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度范围为 $98.6\sim 110.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要宿主于石英颗粒内裂纹中;第三幕油包裹体的均一温度范围为 $74.6\sim 93.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,与其伴生的(含烃)盐水包裹体均一温度范围为 $102.0\sim 115.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 7),这一幕主要在穿石英颗粒裂纹和石英颗粒次生加大边中检测到。因此,顺 10 井区存在三幕两期油充注,缺乏晚期油充注和一幕天然气充注。

3.2.3 单个油包裹体荧光光谱特征 理论和实验均表明原油在紫外光激发下会散发出荧光,且不同性质的原油具有不同的荧光颜色和荧光光谱(Khorasan, 1987; Burruss, 1991; 陈红汉, 2014)。通常情况下,随着烃类成熟度的增加,其荧光颜色会按红色→橙色→黄色→绿色→亮蓝色的规律演化,即发生“蓝移”(Stasiuk and Snowdon, 1997; Munz, 2001)。除了荧光颜色被

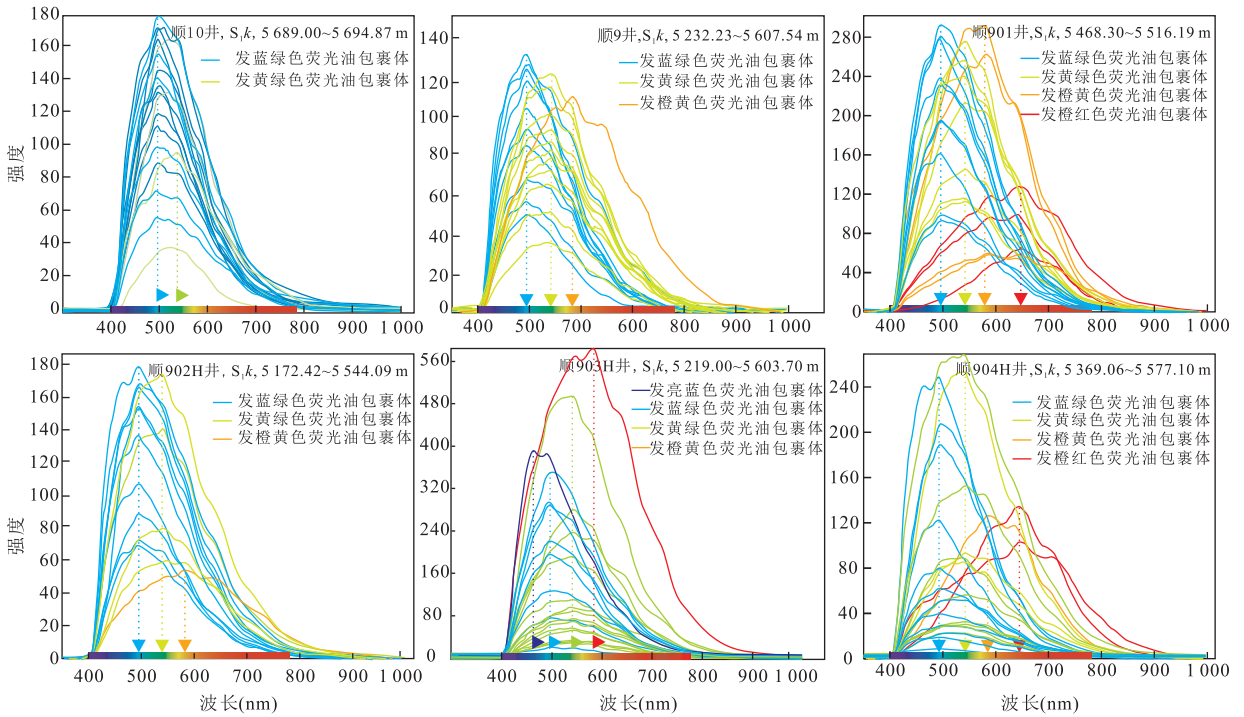


图 8 顺托果勒地区志留系柯坪塔格组单个油包裹体显微荧光光谱

Fig.8 Microspectrofluorimetric graph of individual oil inclusion in the Silurian Kepingtage Formation of Shuntuoguole

表 3 顺托果勒地区志留系柯坪塔格组单个油包裹体显微荧光参数

Table 3 Micro-fluorescence parameters of individual oil inclusion in the Silurian Kepingtage Formation

| 井区 | 油包裹体荧光颜色 | λ_{\max} (nm) | QF-535 |
|------|----------|-----------------------|-----------|
| 顺 9 | 橙红色 | 642~649 | 3.39~6.79 |
| | 橙黄色 | 577~589 | 2.04~3.72 |
| | 黄绿色 | 520~553 | 1.21~2.34 |
| | 蓝绿色 | 480~519 | 0.50~1.42 |
| | 亮蓝色 | 448~469 | 0.47~0.60 |
| 顺 10 | 黄绿色 | 518~537 | 1.38~2.04 |
| | 蓝绿色 | 493~509 | 0.74~1.19 |

用来表征烃类的成熟度外, λ_{\max} (主峰波长)、QF-535 等参数亦能表征烃类的成熟度 (Munz, 2001)。其中 λ_{\max} 是指荧光强度最大时对应的波长, QF-535 为光谱图中波长 720~535 nm 之间的面积与波长 535~420 nm 之间面积的比值, 这两个参数与烃类成熟度之间均为负相关关系。QF-535 与 λ_{\max} 之间的对应关系能够较好地反映烃类的成熟度信息。

顺 9 井区油包裹体荧光颜色有橙红色、橙黄色、黄绿色、蓝绿色和亮蓝色, 而顺 10 井仅检测到黄绿色和蓝绿色荧光油包裹体 (图 8), 其对应的 λ_{\max} 和 QF-535 范围如表 3 所示。根据 λ_{\max} 和 QF-535 相对关系 (图 9) 可知, 相对于顺 9 井区, 顺 10 井缺乏低成熟度

油充注。

3.2.4 单个油包裹体显微红外光谱特征 利用显微红外光谱可以获得单个油包裹体中有机质结构的吸收峰, 一般 $3\ 100\sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 为芳烃 CH 伸缩振动, $3\ 000\sim 2\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 为脂肪烃官能团的伸缩振动, 主要包括 CH_{3a} ($2\ 960\ \text{cm}^{-1}$)、 CH_{2a} ($2\ 925\ \text{cm}^{-1}$)、 CH_{3s} ($2\ 875\ \text{cm}^{-1}$)、 CH_{2s} ($2\ 855\ \text{cm}^{-1}$) 以及 CH 伸缩振动 ($2\ 890\ \text{cm}^{-1}$) 等。Pironon and Barres (1990) 根据对合成包裹体的显微红外分析提出了表征有机质成熟度的 X 系数, 即烷基链碳原子数 $X_{\text{inc}} = [(\sum \text{CH}_2 / \sum \text{CH}_3) - 0.8 / 0.09]$ 和正构烷烃直链碳原子数 $X_{\text{std}} = [(\sum \text{CH}_2 / \sum \text{CH}_3 + 0.1) / 0.27]$; $\text{CH}_{2a} / \text{CH}_{3a}$ 、 X_{inc} 、 X_{std} 值越小, 表明包裹体中有机质的成熟度越高。

笔者对顺托果勒地区顺 9 井区顺 9 井、顺 901 井、顺 902H 井和顺 10 井的单个油包裹体进行了显微红外光谱分析 (图 10), 并提取出红外参数列于表 5 (王倩茹等, 2016)。

笔者根据顺托果勒地区单个油包裹体 X_{std} 与 $\text{CH}_{2a} / \text{CH}_{3a}$ 关系将油包裹体分为 3 类: (1) X_{std} 为 4.39~4.70, $\text{CH}_{2a} / \text{CH}_{3a}$ 值为 0.99~1.29, 表明该类油包裹体的成熟度较高, 代表了一幕高成熟度油充注; (2) X_{std} 为 5.72~7.38, $\text{CH}_{2a} / \text{CH}_{3a}$ 值为 1.45~2.15, 代表了一幕中等成熟度油充注; (3) X_{std} 为 8.28~9.57,

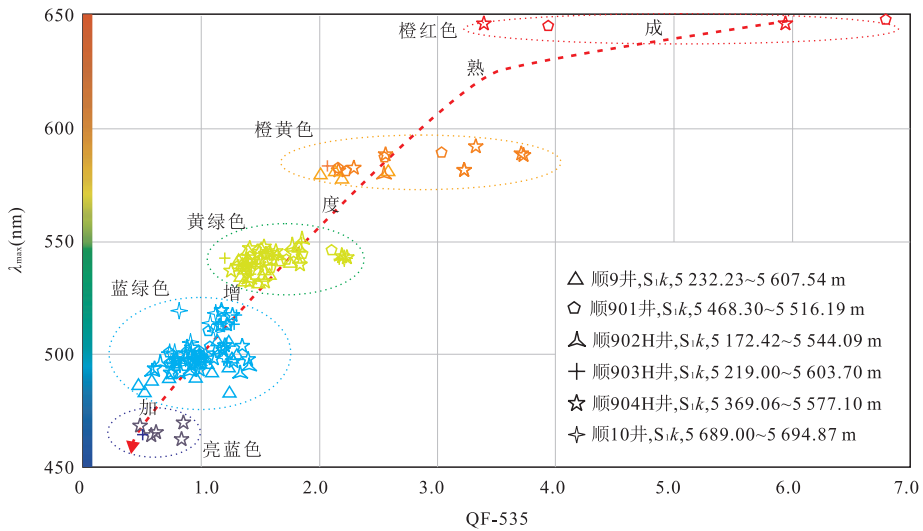


图 9 柯坪塔格组单个油包裹体 λ_{max} 与 QF-535 关系

Fig.9 Relationship between λ_{max} and QF-535 of individual oil inclusion in Kepingtage Formation

表 4 顺托果勒地区柯坪塔格组 (S_{1k}) 单个油包裹体显微红外光谱参数和显微测温数据

Table 4 Micro FT-IR analysis and homogenization temperatures of individual oil inclusion in Kepingtage Formation of Shuntuoguole

| 井号 | 深度 (m) | X _{inc} | X _{std} | CH _{2a} /CH _{3a} | 油包裹体均一温度(°C) | 同期盐水包裹体均一温度(°C) | 充注年龄 (Ma) |
|--------|----------|------------------|------------------|------------------------------------|--------------|-----------------|-----------|
| 顺 9 | 5 600.46 | 3.16 | 4.39 | 0.99 | 26.9 | 58.8 | 410.0 |
| 顺 9 | 5 599.59 | 3.61 | 4.54 | 1.02 | 23.5 | 61.7 | 403.3 |
| 顺 9 | 5 597.27 | 8.31 | 6.10 | 2.15 | 77.8 | 92.5 | 265.1 |
| 顺 9 | 5 600.46 | 10.64 | 6.88 | 1.62 | 75.9 | 93.8 | 264.7 |
| 顺 9 | 5 600.46 | 10.00 | 6.67 | 1.45 | 75.6 | 110.3 | 253.8 |
| 顺 9 | 5 600.46 | 10.21 | 6.74 | 1.86 | 82.5 | 108.2 | 256.2 |
| 顺 9 | 5 597.95 | 12.15 | 7.38 | 1.78 | 65.6 | 90.6 | 272.3 |
| 顺 9 | 5 600.46 | 14.85 | 8.28 | 1.66 | 97.3 | 126.2 | 10.2 |
| 顺 9 | 5 597.95 | 16.36 | 8.79 | 2.04 | 99.0 | 130.0 | 8.4 |
| 顺 9 | 5 599.59 | 17.79 | 9.26 | 2.00 | 101.5 | 127.7 | 9.6 |
| 顺 9 | 5 600.46 | 18.72 | 9.57 | 2.39 | 96.5 | 125.4 | 9.9 |
| 顺 901 | 5 497.00 | 7.17 | 5.72 | 1.67 | 79.1 | 102.4 | 260.0 |
| 顺 901 | 5 497.00 | 10.50 | 6.83 | 1.93 | 84.6 | 112.5 | 252.0 |
| 顺 901 | 5 497.00 | 11.46 | 7.15 | 1.71 | 83.9 | 110.3 | 253.1 |
| 顺 902H | 5 301.62 | 9.94 | 6.65 | 1.62 | 75.4 | 96.5 | 265.4 |
| 顺 902H | 5 301.62 | 11.97 | 7.32 | 1.78 | 68.7 | 89.4 | 268.7 |
| 顺 10 | 5 693.11 | 3.74 | 4.58 | 1.23 | 16.0 | 54.2 | 415.6 |
| 顺 10 | 5 693.11 | 3.98 | 4.66 | 1.20 | 15.6 | 44.8 | 416.9 |
| 顺 10 | 5 693.11 | 4.11 | 4.70 | 1.22 | 19.8 | 70.6 | 408.4 |
| 顺 10 | 5 694.27 | 9.59 | 6.53 | 1.63 | 79.5 | 102.3 | 270.5 |
| 顺 10 | 5 694.27 | 10.40 | 6.80 | 1.63 | 83.8 | 106.7 | 254.8 |
| 顺 10 | 5 694.27 | 3.60 | 4.53 | 1.29 | 16.4 | 55.3 | 418.2 |

CH_{2a}/CH_{3a}值为 1.66~2.39,表明该类油包裹体的成熟度较低,代表了一幕低成熟度油充注(图 10)。

然而,顺 10 井区只存在两类油包裹体, X_{std} 的范围分别为 4.53~4.70 和 6.53~6.80, CH_{2a}/CH_{3a} 值分别为 1.20~1.29 和 1.63,说明顺 10 井区存在中等成熟度和高成熟度两幕油充注,而缺乏低成熟度原油充注。

3.3 储层沥青特征

塔中北坡志留系柯坪塔格组沥青砂岩岩心观察

结果显示,储层沥青宏观产状包括顺层理分布、呈斑点和块状分布;微观产状主要有 3 种赋存状态,以脉状形式产于裂缝中、大面积孔隙充填和零星分布于孔隙边缘(王倩茹等,2016)。应用显微红外光谱仪采集微区储层沥青红外光谱,结果如图 11 所示,顺 9 井区志留系沥青大致被分为 3 类:(1)该类沥青富含脂肪族基团(3 000~2 800 cm⁻¹)以及明显的芳环 CH 吸收峰(3 100~3 000 cm⁻¹),基本不含 C=O(1 850~1 650 cm⁻¹)等基团(图 11a);(2)储层沥青富含脂肪

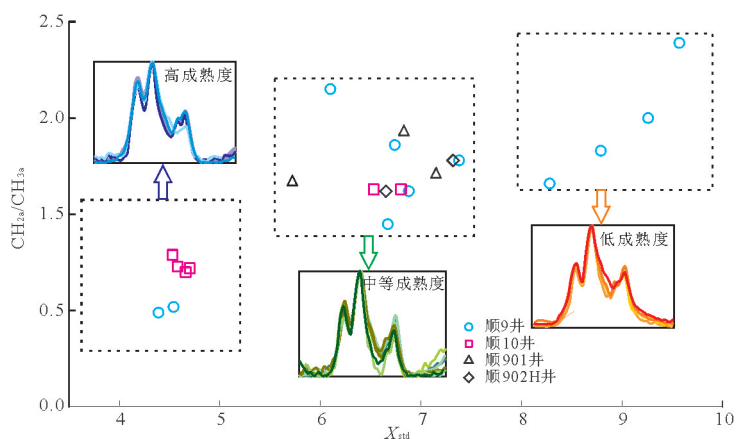


图 10 顺托果勒地区柯坪塔格组单个油包裹体红外光谱特征

Fig.10 Micro FT-IR characteristics of individual oil inclusion of Kepingtage Formation in Shuntuoguole

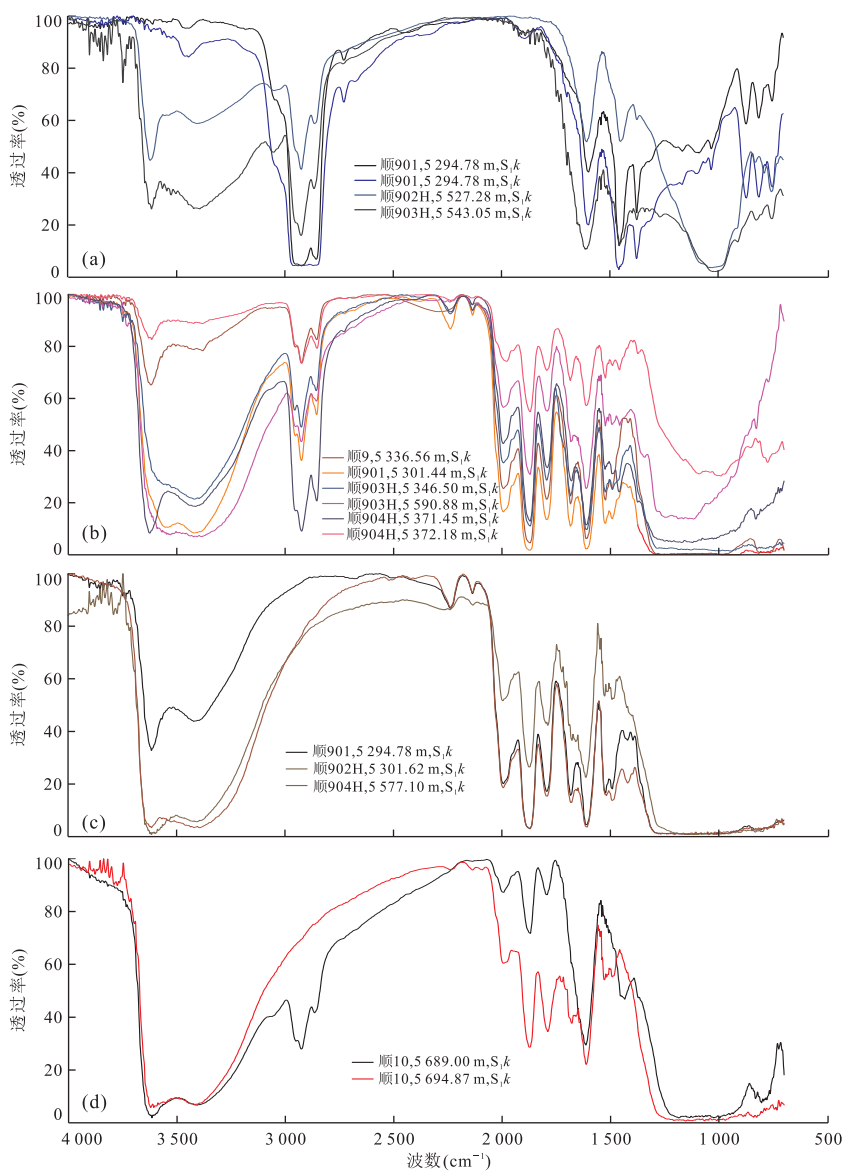


图 11 顺托果勒地区柯坪塔格组不同成因储层沥青显微红外光谱特征

Fig.11 Micro FT-IR spectra characteristics of different origin of bitumens in Kepingtage Formation of Shuntuoguole

表5 顺托果勒地区柯坪塔格组(S_1k)沥青显微红外光谱数据

Table 5 Micro FT-IR parameters of bitumens in Kepingtage Formation of Shuntuoguole

| 井号 | 深度(m) | 沥青产状 | CH_{2a}/CH_{3a} | X_{inc} | X_{std} | $AR_{H3000-3100}/AL_{2800-3000}$ |
|-------|----------|-------|-------------------|-----------|-----------|----------------------------------|
| 顺10 | 5 694.87 | 顺层理分布 | 1.66 | 7.25 | 5.75 | 0.11 |
| 顺10 | 5 689.00 | 顺层理分布 | 1.45 | 2.34 | 4.11 | 0.07 |
| 顺9 | 5 336.56 | 块状沥青 | 1.98 | 17.10 | 9.03 | 0.00 |
| 顺901 | 5 294.78 | 顺层理分布 | 3.04 | 0.88 | 3.63 | 0.16 |
| 顺901 | 5 294.78 | 顺层理分布 | 2.19 | 12.24 | 7.41 | 0.05 |
| 顺901 | 5 301.44 | 块状沥青 | 1.72 | 10.53 | 6.84 | 0.02 |
| 顺902H | 5 517.07 | 块状沥青 | 1.71 | 6.78 | 5.59 | 0.04 |
| 顺902H | 5 543.05 | 块状沥青 | 1.73 | 5.84 | 5.28 | 0.05 |
| 顺902H | 5 527.28 | 块状沥青 | 1.65 | 9.22 | 6.41 | 0.04 |
| 顺903H | 5 590.88 | 块状沥青 | 2.17 | 15.17 | 8.39 | 0.04 |
| 顺903H | 5 346.50 | 顺层理分布 | 6.36 | 53.99 | 21.33 | 0.00 |
| 顺904H | 5 372.18 | 斑点状沥青 | 2.00 | 20.36 | 10.12 | 0.00 |
| 顺904H | 5 577.10 | 块状沥青 | 1.77 | 15.81 | 8.60 | 0.00 |
| 顺904H | 5 371.45 | 顺层理分布 | 1.62 | 8.45 | 6.15 | 0.00 |

族基团和 C=O 等基团,低于 $1\ 300\text{ cm}^{-1}$ 的红外辐射大部分被吸收(图 11b);(3)该类沥青基本不含或含极少脂肪族基团,但是含有 C=O 等基团,低于 $1\ 300\text{ cm}^{-1}$ 的红外辐射几乎全部被吸收(图 11c)。顺 10 井沥青红外光谱均检测到 C=O 基团,而脂肪族基团的分布具有明显的差异,低于 $1\ 300\text{ cm}^{-1}$ 的红外辐射几乎全部被吸收(图 11d)。

由于储层沥青等样品有机结构较为复杂,红外吸收峰重叠现象较为严重,笔者采用高斯-洛伦茨组合函数模型将重叠的吸收峰分解为独立的子峰,并提取 CH_{2a}/CH_{3a} 、 $AL_{2800-3000}$ (脂肪族 CH_2 和 CH_3 振动区)以及 $AR_{H3000-3100}$ (芳环 CH 伸缩振动区)等红外参数(表 5)。 CH_{2a}/CH_{3a} 强度比值、 X_{inc} 和 X_{std} 越高,意味着沥青的成熟度越低; $AR_{H3000-3100}/AL_{2800-3000}$ 强度比值越大,说明芳烃比重越高。顺 9 井区顺层理分布的沥青成熟度较低, CH_{2a}/CH_{3a} 值为 1.62~6.36, X_{inc} 和 X_{std} 变化范围较大;块状沥青成熟度相对较高, CH_{2a}/CH_{3a} 介于 1.65~2.17;斑点状沥青 CH_{2a}/CH_{3a} 值为 2.00,不含芳烃 CH 基团。 $AR_{H3000-3100}/AL_{2800-3000}$ 比值显示顺 9 井区含有少量或者不含芳烃 CH 基团,相对而言,顺 10 井芳烃 CH 基团含量较高,为 0.07~0.11。顺 10 井顺层理分布的沥青 CH_{2a}/CH_{3a} 值为 1.45~1.66。

4 讨论

4.1 油气充注期次和时间

笔者综合成岩序次分析、荧光光谱分析、显微红外光谱分析和流体包裹体的显微测温分析结果,并

且通过对塔中北坡志留系柯坪塔格组与油包裹体伴生的盐水包裹体在埋藏史图进行投影进而确定油气成藏时间,认为其存在“四幕三期油充注”和一期天然气充注(图 12,以顺 9 井为例),第一幕充注的油主要出于石英颗粒内裂纹,为第一期油充注,充注时间为 419.6~398.1 Ma,始于加里东晚期,持续到海西早期(表 6),但由于海西早期地层的抬升剥蚀使顺托果勒地区志留系暴露地表,原油发生水洗、氧化和生物降解等作用而形成现今大面积分布的沥青(刘洛夫等,2000b;张水昌等,2011);第二幕油充注时间为 271.5~255.4 Ma,捕获的油包裹体主要宿主于石英颗粒内裂纹,而穿石英颗粒裂纹和石英颗粒次生加大边为第三幕油充注的结果,充注时间为 258.1~224.0 Ma,两幕油为海西晚期开始充注,后因地层抬升剥蚀油气遭受一定程度的生物降解形成稠油或沥青;第四幕充注的油主要宿主于方解石胶结物和穿石英颗粒裂纹及加大边中,充注时间为 11.4~2.2 Ma,为第三期油充注;一期天然气充注的时间为 11.1~1.1 Ma,捕获的天然气包裹体主要寄宿于穿石英颗粒裂纹中,第四幕充注的油和一期天然气发生在喜山期,并对早期充注的原油起到了一定的改善作用,扩大了油气充注和成藏的规模(Zhang *et al.*, 2011;张水昌等,2012)。

然而,顺 10 井区只存在“三幕两期”油充注(图 12),未检测到晚期充注的油包裹体,第一幕油包裹体主要捕获于石英颗粒内裂纹,为第一期油充注,充注时间为 419.6~408.4 Ma,自加里东晚期至海西早期,海西早期地层抬升剥蚀,古油藏遭受破坏形成大面积分布的志留系沥青砂岩;捕获于石英颗粒内裂

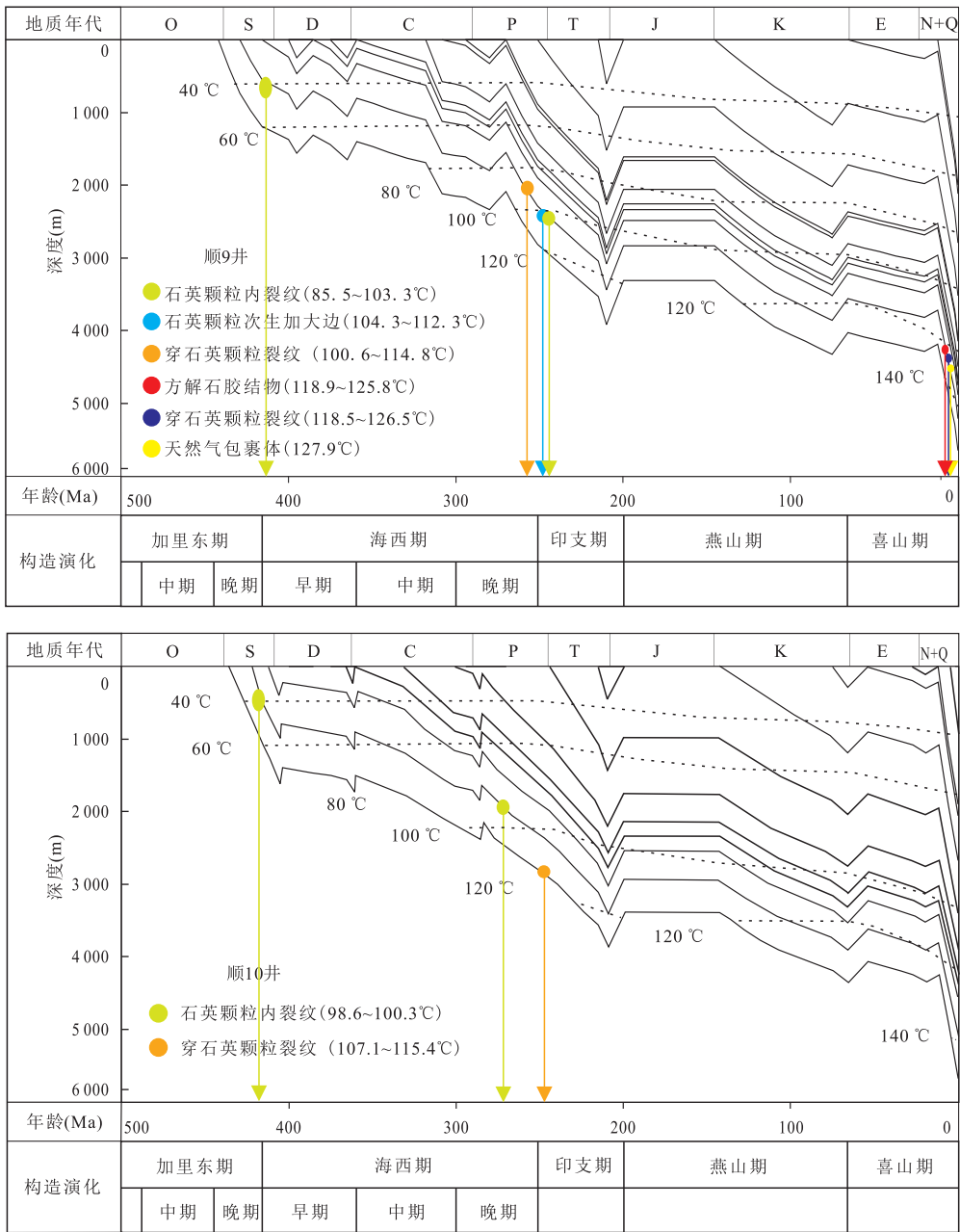


图 12 顺托果勒地区柯坪塔格组油气成藏期次划分与成藏时期

Fig.12 Hydrocarbon charging periods of Kepingtage Formation in Shuntuoguole

表 6 顺托果勒地区柯坪塔格组油气充注时期

Table 6 Hydrocarbon charging periods of Kepingtage Formation in Shuntuoguole

| 井区 | 充注幕次 | 充注年龄(Ma) | 充注时期 |
|------|------|-------------|------------|
| 顺 9 | 第一幕 | 419.6~398.1 | 加里东晚期—海西早期 |
| | 第二幕 | 271.5~255.4 | 海西晚期 |
| | 第三幕 | 258.1~224.0 | 海西晚期 |
| | 第四幕 | 11.4~2.2 | 喜山期 |
| | 第四幕 | 11.1~1.1 | 喜山期 |
| 顺 10 | 第一幕 | 419.6~408.4 | 加里东晚期—海西早期 |
| | 第二幕 | 271.6~261.2 | 海西晚期 |
| | 第三幕 | 254.8~236.8 | 海西晚期 |

纹的油包裹体为第二幕充注的油,充注时间为 271.6~261.2 Ma,第三幕充注的油主要在石英颗粒次生加大边和穿石英颗粒裂纹中检测到,充注时间为 254.8~236.8 Ma,这两幕充注的油为第二期,主要发生在海西晚期,油气沿不整合面侧向长距离运移过程中经历次生作用形成顺层理分布的沥青(张水昌等,2011).

根据顺 9 井、顺 901 井和顺 902H 井可动油显微红外光谱数据(图 13), CH_{2a}/CH_{3a} 强度值为 3.24~3.49, X_{inc} 为 19.42~21.39, X_{std} 为 9.81~

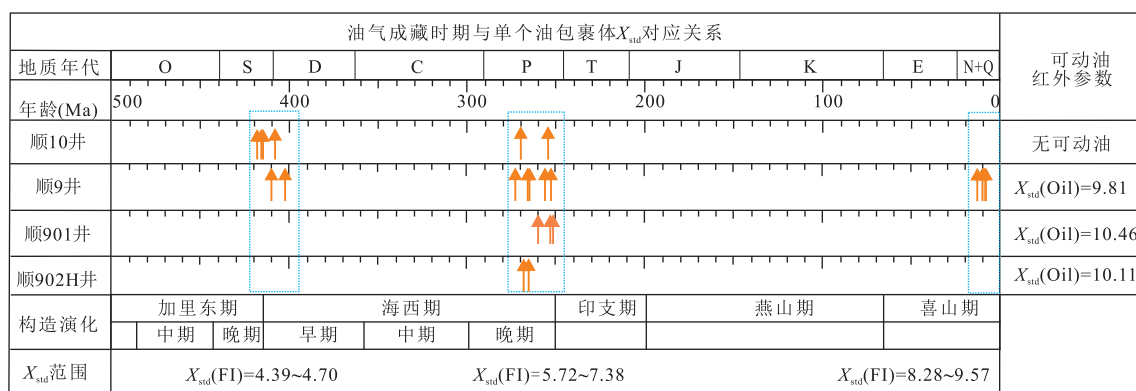


图 13 原油和单个油包裹体显微红外光谱参数对比

Fig.13 Micro FT-IR parameters comparison between crude oils and individual oil inclusion

10.46.单个油包裹体的显微红外特征表明,顺9井区油包裹体的成熟度有3种类型,低成熟度、中等成熟度和高成熟度;顺10井区检测到的油包裹体只有中等成熟度和高成熟度两种类型,缺乏低成熟度油包裹体.因此,顺9井区的可动油可能为喜山期充注的原油.

4.2 储层沥青的成因

为探讨塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因和演化期次,不同学者综合利用岩石学、有机岩石学和有机地球化学等方法进行了深入分析(刘大猛等,1999;刘洛夫等,2000a,2000b,2001a,2001b).刘洛夫等(2000b,2001b)认为塔里木盆地志留系沥青砂岩主要为古油气藏破坏的产物,其成因包括表生—浅层氧化沥青、储层分异沥青、蒸发分馏沥青、水洗沥青和热变质沥青.沥青砂岩的形成是烃类多期次注入的结果(刘洛夫等,2001a).在前人研究的基础上,综合研究区储层沥青的产状特征,本文首次应用显微红外光谱特征和参数结果,对研究区储层沥青成因作出初步讨论:

第1种,该类沥青富含脂肪族基团以及明显的芳环CH吸收峰,基本不含C=O等基团(图11a).宏观上,该类沥青顺层理分布或呈块状分布;微观上,沥青呈脉状充填于裂缝或大面积充填于孔隙中.结合红外参数及光谱特征,笔者推测该类沥青可能为油气运移过程中遭受生物降解和水洗淋滤作用所致.

第2种,储层沥青富含脂肪族基团(如 CH_3 和 CH_2)和C=O等基团(图11b).微观上,该类沥青以纯沥青的形式充填于孔隙中或分布于颗粒边缘;宏观上,该类沥青主要为斑点状或顺层理分布.因此,笔者推测其为原油经历过氧化作用和生物降解作用以及后期原油再次充注的结果.

第3种,该类沥青基本不含或含量极少脂肪族基团,但是含有C=O等基团(图11c).此类沥青在宏观和微观上零星分布,可能为前期原油遭受过严重的生物降解作用、后期油充注后遭受氧化降解作用,红外光谱为两期沥青化作用叠加的结果.

顺9井区检测到上述3种类型的储层沥青,而顺10井的储层沥青均检测到含氧官能团(图11d),说明顺10井原油可能都遭受过氧化降解作用.

4.3 成藏期差异性成因分析

前人通过对塔中北坡构造解析,认为塔中北坡走滑断裂控制了油气纵向分布的差异性(黄太柱,2014),是油气运移的重要通道(李明杰等,2006;马庆佑等,2012;杨圣彬等,2013).笔者综合前人的研究成果,通过对顺9井区3D地震剖面层位和断裂解释(图14)发现,志留系油气是通过NE向左旋走滑断裂、从 T_7^4 界面以下的烃源灶或油气藏中垂向输导上来的.其中,NE向左旋走滑断裂由一系列雁列、且延伸不远的断裂带所构成;“拉分断陷”和“应力释放带”成为油气垂向运移的“高速公路”,油气从拉分断陷等向上运移,然后向四周运移.

NE向走滑断裂对塔中北坡志留系油气成藏的贡献主要为海西早期,该时期中—上奥陶统烃源岩处于生油高峰,而此时NE向张扭性走滑断裂正值活动期,中—上奥陶统烃源岩排出的油气沿着走滑断裂垂向运移到志留系柯坪塔格组圈闭中,形成了顺9井的原生油藏.但是海西早期的构造运动使志留系的油藏受到氧化、水洗和生物降解等破坏作用,从而形成了普遍存在的干沥青.

海西晚期,塔中北坡形成了少量继承性活动张扭走滑断裂,生成的油气沿着NE向走滑断裂进入志留系储层,成为志留系的第二期充注的油气,此时

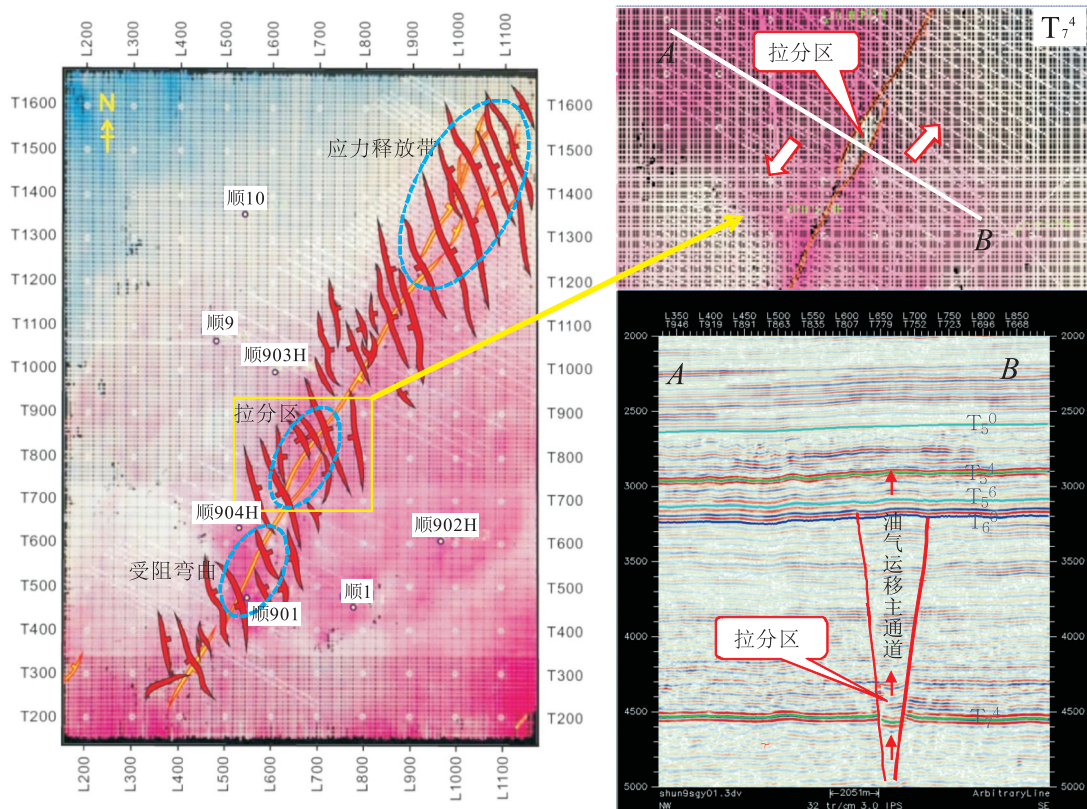


图 14 顺 9 井区 T74 界面断裂解释

Fig.14 Faults interpretation of T74 boundary in shun 9 well block

充注的油气为志留系柯坪塔格组大规模成藏时期，但因生物降解作用等而普遍稠油化、甚至沥青化。

喜山期，塔中北坡 NE 向走滑断裂虽处于静止时期，但是由于其走向与区域应力场方向一致，有利于裂缝的开启，对烃源岩排出的原油和古油藏大量裂解的天然气起到了良好的疏导作用，造就了柯坪塔格组晚期油气的充注，并且该时期油气的充注决定了是否存在工业性油气流。因此，对于离 NE 向走滑断裂较近的井（顺 9 井、顺 901 井、顺 902H 井、顺 903H 井、顺 904H 井），均存在喜山期原油和天然气的充注；顺 10 井远离断裂输导体系，又处于 T_6^0 界面构造低部位，第三期油气难以向其运移聚集，未检测到晚期油包裹体，缺乏喜山期原油和天然气的充注。

5 结论

(1) 储层沥青和流体包裹体系统分析结果表明，顺 9 井区有三期油充注和一期天然气充注，第一期为加里东晚期充注的油（419.6~398.1 Ma），第二期为海西晚期（271.5~224.0 Ma），第三期充注的油（11.4~2.2 Ma）和一期天然气（11.1~1.1 Ma）发生

在喜山期；而顺 10 井区只存在两期油充注，第一期为加里东晚期充注的油（419.6~408.4 Ma），第二期充注的油主要发生在海西晚期（271.6~236.8 Ma）。

(2) 顺 9 井区单个油包裹体的显微红外光谱分析说明其成熟度有 3 种类型，低成熟度、中等成熟度和高成熟度；顺 10 井区检测到的油包裹体只有高成熟度和中等成熟度 2 种类型，缺少低成熟度油包裹体。综合单个油包裹体和顺 9 井区可动油的显微红外光谱分析，笔者认为顺 9 井区的可动油可能为喜山期充注的原油。

(3) 塔中北坡 NE 向走滑断裂是志留系油气运移的重要输导体系，控制了顺托果勒地区柯坪塔格组晚期油气充注，并且决定了该区工业油流。因此，塔中北坡志留系油气勘探的关键是寻找喜山期充注的油气藏。

References

- Alstadt, K.N., Katti, D.R., Katti, K.S., 2012. An In Situ FTIR Step-Scan Photoacoustic Investigation of Kerogen and Minerals in Oil Shale. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 89: 105–113.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.10.078>

- Burruss, R., 1991. Practical Aspects of Fluorescence Microscopy of Petroleum Fluid Inclusions. *Society of Economic Paleontologists & Mineralogists*, 25 (1): 1—7. <https://doi.org/10.2110/scn.91.25>
- Chen, H. H., 2014. Microspectrofluorimetric Characterization and Thermal Maturity Assessment of Individual Oil Inclusion. *Acta Petrolei Sinica*, 35(3): 584—590 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. H., Mi, L. J., Liu, Y. H., et al., 2017. Genesis, Distribution and Risk Belt Prediction of CO₂ in Deep-Water Area in the Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(2): 119—134 (in Chinese with English abstract).
- Ferket, H., Guilhaumou, N., Roure, F., et al., 2011. Insights from Fluid Inclusions, Thermal and PVT Modeling for Paleo-Burial and Thermal Reconstruction of the Córdoba Petroleum System (NE Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 28(4): 936—958. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.01.020>
- Ganz, H., Kalkreuth, W., 1987. Application of Infrared Spectroscopy to the Classification of Kerogen Types and the Evaluation of Source Rock and Oil Shale Potentials. *Fuel*, 66(5): 708—711. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90285-7](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90285-7)
- Huang, H. P., Zhang, S. C., Su, J., 2016. Palaeozoic Oil-Source Correlation in the Tarim Basin, NW China: A Review. *Organic Geochemistry*, 94: 32—46. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.01.008>
- Huang, T. Z., 2014. Structural Interpretation and Petroleum Exploration Targets in Northern Slope of Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(3): 257—267 (in Chinese with English abstract).
- Huo, Z. P., Jiang, T., Pang, X. Q., et al., 2016. Evaluation of Deep Carbonate Source Rocks with Low TOC and Contribution to Oil-Gas Accumulation in Tazhong Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 41(12): 2061—2074 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.143>
- Khorasani, G. K., 1987. Novel Development in Fluorescence Microscopy of Complex Organic Mixtures: Application in Petroleum Geochemistry. *Organic Geochemistry*, 11(3): 157—168. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(87\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(87)90019-2)
- Li, F., Jiang, Z. X., Li, Z., et al., 2016. Fluid Inclusion Characteristic and Hydrocarbon Charge History of Dibeil Gas Reservoir in the Kuqa Depression. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(2): 515—523 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Hu, S. H., Wang, Q. G., et al., 2006. Discovery of Strike-Slip Fault System in Tazhong Area and Geologic Meaning. *Oil Geophysical Prospecting*, 41(1): 116—121 (in Chinese with English abstract).
- Lis, G. P., Mastalerz, M., Schimmelmann, A., et al., 2005. FT-IR Absorption Indices for Thermal Maturity in Comparison with Vitrinite Reflectance R_o in Type-II Kerogens from Devonian Black Shales. *Organic Geochemistry*, 36(11): 1533—1552. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.07.001>
- Liu, D. M., Jin, K. L., Wang, L. Z., 1999. Characteristics and Genesis of Silurian Bituminous Sandstone in the Tarim Basin. *Geoscience*, 13(2): 49—55 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Fang, J. H., Wang, H. Y., 2001a. Petrological Characteristics of the Silurian Asphaltic Sandstones in Talimu Basin and the Significance of Studying Them. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 16(1): 16—22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Zhao, J. Z., Zhang, S. C., et al., 2001b. The Depositional and Structural Settings and the Bituminous Sandstone Distribution Characters of the Silurian in Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 22(6): 11—17 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Zhao, J. Z., Zhang, S. C., et al., 2000a. Hydrocarbon Filling Ages and Evolution of the Silurian Asphalt Sandstones in Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 475—479 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Zhao, J. Z., Zhang, S. C., et al., 2000b. Genetic Types and Characteristics of the Silurian Asphaltic Sandstones in Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 21(6): 12—17 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. S., Song, Y., Liu, S. B., et al., 2012. Detailed Analysis of Fluid Inclusions and Its Application in Accumulation History Research on Silurian Reservoirs in Tazhong Area, Tarim Basin. *Journal of China University of Petroleum*, 36(4): 45—50, 76 (in Chinese with English abstract).
- Lü, X. X., Bai, Z. K., Zhao, F. Y., 2008. Hydrocarbon Accumulation and Distributional Characteristics of the Silurian Reservoirs in the Tazhong Uplift of the Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 156—166 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q. Y., Sha, X. G., Li, Y. L., et al., 2012. Characteristics of Strike-Slip Fault and Its Controlling on Oil in Shuntuoguole Region, Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2): 120—124 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. Y., Huang, W., Li, J. J., et al., 2013. Geochemical Char-

- acteristics of Crude Oil from Lower Kalpintag Formation in SH9 Well Area, Northern Slope of Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(5): 559—563 (in Chinese with English abstract).
- Munz, I. A., 2001. Petroleum Inclusions in Sedimentary Basins: Systematics, Analytical Methods and Applications. *Lithos*, 55(1—4): 195—212. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00045-1)
- Odeh, A. O., 2015. Qualitative and Quantitative ATR-FTIR Analysis and Its Application to Coal Char of Different Ranks. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 43(2): 129—137. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(15\)30001-3](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(15)30001-3)
- Okolo, G. N., Neomagus, H. W. J. P., Everson, R. C., et al., 2015. Chemical-Structural Properties of South African Bituminous Coals: Insights from Wide Angle XRD-Carbon Fraction Analysis, ATR-FTIR, Solid State ¹³C NMR, and HRTEM Techniques. *Fuel*, 158: 779—792. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.027>
- Pironon, J., Barres, O., 1990. Semi-Quantitative FT-IR Microanalysis Limits: Evidence from Synthetic Hydrocarbon Fluid Inclusions in Sylvite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 509—518. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90348-o](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90348-o)
- Pironon, J., Thiéry, R., Teinturier, S., et al., 2000. Water in Petroleum Inclusions: Evidence from Raman and FT-IR Measurements, PVT Consequences. *Journal of Geochemical Exploration*, 69—70: 663—668. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(00\)00108-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(00)00108-4)
- Qin, Z. H., Chen, H., Yan, Y. J., et al., 2015. FTIR Quantitative Analysis upon Solubility of Carbon Disulfide/N-Methyl-2-Pyrrolidinone Mixed Solvent to Coal Petrographic Constituents. *Fuel Processing Technology*, 133: 14—19. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.001>
- Stasiuk, L. D., Snowdon, L. R., 1997. Fluorescence Microspectrometry of Synthetic and Natural Hydrocarbon Fluid Inclusions: Crude Oil Chemistry, Density and Application to Petroleum Migration. *Applied Geochemistry*, 12(3): 229—241. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(96)00047-9)
- Wang, Q. R., Chen, H. H., Hu, S. Z., et al., 2016. Curve-Fitting Analysis of Micro FT-IR and Its Application on Individual Oil Inclusion and Micro-Area Bitumens. *Earth Science*, 41(11): 1921—1934 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.133>
- Weng, S. F., 2010. Fourier Transform Infrared Spectrum Analysis. Chemical Industry Press, Beijing, 269—272 (in Chinese).
- Yang, S. B., Liu, J., Li, H. L., et al., 2013. Characteristics of the NE-Trending Strike-Slip Fault System and Its Control on Oil Accumulation in North Peri-Cline Area of the Tazhong Paleouplift. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 797—802 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Su, J., Wang, X. M., et al., 2011. Geochemistry of Palaeozoic Marine Petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 3. Thermal Cracking of Liquid Hydrocarbons and Gas Washing as the Major Mechanisms for Deep Gas Condensate Accumulations. *Organic Geochemistry*, 42(11): 1394—1410. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.08.013>
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Li, B. L., et al., 2011. History of Hydrocarbon Accumulations Spanning Important Tectonic Phases in Marine Sedimentary Basins of China: Taking the Tarim Basin as an Example. *Petroleum Exploration and Development*, 38(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Zhang, B., Yang, H. J., et al., 2012. Adjustment and Alteration of Hydrocarbon Reservoirs during the Late Himalayan Period, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 668—680 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Y., Luo, X. Q., 2012. K-Ar and Ar-Ar Dating of Authigenic Illite and Hydrocarbon Accumulation History of Carboniferous and Silurian Sandstone Reservoirs in Well Ha 6, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(5): 748—757 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Y., Zwingmann, H., Liu, K. Y., et al., 2007. K-Ar Isotopic Dating of Authigenic Illite and Its Application to the Investigation of Hydrocarbon Accumulation History of the Silurian Bituminous Sandstone Reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 28(2): 166—174 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Y., Zwingmann, H., Liu, K. Y., et al., 2011. Hydrocarbon Charge History of the Silurian Bituminous Sandstone Reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China. *AAPG Bulletin*, 95(3): 395—412. <https://doi.org/10.1306/08241009208>
- Zhao, J. Z., Li, Q. M., 2002. Hydrocarbon Accumulation Periods and History in Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47(S1): 116—121 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈红汉, 2014. 单个油包裹体显微荧光特性与热成熟度评价. *石油学报*, 35(3): 584—590.
- 陈红汉, 米立军, 刘妍鹤, 等, 2017. 珠江口盆地深水 CO₂ 成因、分布规律与风险带预测. *石油学报*, 38(2): 119—

- 134.
- 黄太柱,2014.塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向.石油实验地质,36(3):257-267.
- 霍志鹏,姜涛,庞雄奇,等,2016.塔中地区深层低丰度碳酸盐岩有效烃源岩评价及其对油气藏的贡献.地球科学,41(12):2061-2074.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.143>
- 李峰,姜振学,李卓,等,2016.库车坳陷迪北气藏流体包裹体特征及油气充注历史.中南大学学报(自然科学版),47(2):515-523.
- 李明杰,胡少华,王庆果,2006.塔中地区走滑断裂体系的发现及其地质意义.石油地球物理勘探,41(1):116-121.
- 刘大锰,金奎励,王凌志.1999.塔里木盆地志留系沥青砂岩的特性及其成因.现代地质,13(2):49-55.
- 刘洛夫,方家虎,王鸿燕,2001a.塔里木盆地志留系沥青砂岩岩石学特征及其意义.西安石油大学学报(自然科学版),16(1):16-22.
- 刘洛夫,赵建章,张水昌,等,2001b.塔里木盆地志留系沉积构造及沥青砂岩的特征.石油学报,22(6):11-17.
- 刘洛夫,赵建章,张水昌,等,2000a.塔里木盆地志留系沥青砂岩的形成期次及演化.沉积学报,18(3):475-479.
- 刘洛夫,赵建章,张水昌,等,2000b.塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因类型及特征.石油学报,21(6):12-17.
- 鲁雪松,宋岩,柳少波,等,2012.流体包裹体精细分析在塔中志留系油气成藏研究中的应用.中国石油大学学报(自然科学版),36(4):45-50,76.
- 吕修祥,白忠凯,赵风云,2008.塔里木盆地塔中隆起志留系油气成藏及分布特点.地学前缘,15(2):156-166.
- 马庆佑,沙旭光,李玉兰,等,2012.塔中顺托果勒区块走滑断裂特征及控油作用.石油实验地质,34(2):120-124.
- 马中远,黄苇,李婧婧,等,2013.塔中北坡 SH9 井区柯坪塔格组下段原油地球化学特征.石油实验地质,35(5):559-563.
- 王倩茹,陈红汉,胡守志,等,2016.单个油包裹体和微区沥青显微红外光谱分峰拟合技术及应用.地球科学,41(11):1921-1934.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.133>
- 翁诗甫,2010.傅里叶变换红外光谱分析.北京:化学工业出版社,269-272.
- 杨圣彬,刘军,李慧莉,等,2013.塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用.石油与天然气地质,34(6):797-802.
- 张水昌,张宝民,李本亮,等,2011.中国海相盆地跨重大构造期油气成藏历史——以塔里木盆地为例.石油勘探与开发,38(1):1-15.
- 张水昌,张斌,杨海军,等,2012.塔里木盆地喜马拉雅晚期油气藏调整与改造.石油勘探与开发,39(6):668-680.
- 张有瑜,罗修泉,2012.塔里木盆地哈6井石炭系、志留系砂岩自生伊利石 K-Ar、Ar-Ar 测年与成藏年代.石油学报,33(5):748-757.
- 张有瑜,Zwingmann,H.,刘可禹,等,2007.塔中隆起志留系沥青砂岩油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素测年研究与成藏年代探讨.石油与天然气地质,28(2):166-174.
- 赵靖舟,李启明,2002.塔里木盆地克拉通区海相油气成藏期与成藏史.科学通报,47(S1):116-121.