

文章编号: 0253-2697(2024)06-0947-14 DOI:10.7623/syxb202406005

塔里木盆地富满油田深层—超深层油气成藏过程

黄亚浩¹ 汪如军² 文志刚¹ 张银涛² 崔仕提² 李梦勤² 王彭² 何涛华¹

(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公司 新疆库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地台盆区深层—超深层油气资源潜力巨大,其中,富满油田奥陶系—一间房组—鹰山组油气成藏过程复杂,油气相态在平面上的分布差异明显。基于碳酸盐胶结物原生油包裹体和碳酸盐脉体的微区 U-Pb 同位素定年结果,确定了富满油田储层充填3期缝洞型脉体,主要存在3期原油充注和1期天然气充注。第1期原油充注发生在加里东中期(473.3~447.4 Ma),第2期原油充注发生在海西中—晚期(348.2~273.9 Ma),第3期原油充注发生在印支期—燕山早期(217.6~205.2 Ma);1期天然气大规模充注在燕山晚期—喜马拉雅期(90~20 Ma);3期缝洞充填脉体对应3期原油充注时期和构造活动时间。富满油田南部与北部不同区域充注的古原油的成熟度和类型不同,主要受控于不同区域寒武系玉尔吐斯组烃源岩的热演化程度,寒武系烃源岩的热演化过程和台盆区构造活动时间与油气充注过程具有时空匹配关系。研究成果有助于提高对深层—超深层碳酸盐岩油气成藏机理和油气富集规律的认识。

关键词:流体包裹体;同位素定年;深层油气;碳酸盐岩;塔里木盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation process of the deep to ultra deep reservoirs in Fuman oilfield, Tarim Basin

Huang Yahao¹ Wang Rujun² Wen Zhigang¹ Zhang Yintao² Cui Shiti²
Li Mengqin² Wang Peng² He Taohua¹

(1. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Geochemistry and Environment, Yangtze University, Hubei Wuhan 430100, China;
2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China)

Abstract: The platform area of Tarim Basin possesses a vast hydrocarbon resource potential in deep to ultra-deep reservoirs. Tarim Basin has experienced a complex of hydrocarbon accumulation in the Ordovician Yijianfang Formation and Yingshan Formation in Fuman oilfield. Meanwhile, there is a significant difference in the planar distribution of hydrocarbon phases. Based on micro-area U-Pb isotope dating of carbonate cement and crude oil inclusions as well as carbonate veins, this study has determined three stages of fracture-cave type vein filling in reservoirs of Fuman oilfield, three stages of crude oil charging and one stage of natural gas charging. Specifically, the Stage-1 of crude oil charging occurred during the Middle Caledonian Period (473.3-447.4 Ma), the Stage-2 spanned from the Middle Devonian to the Late Devonian Period (348.2-273.9 Ma), the Stage-3 occurred during the Early Indosinian to Yanshanian Period (217.6-205.2 Ma), and the natural gas charging occurred on a large scale during the Late Yanshanian to Himalayan (90-20 Ma). The three stages of fracture-cave type vein filling correspond to the three stages of crude oil charging and tectonic activity. There are differences in the maturity and type of paleo oils charged in the southern and northern parts of Fuman oilfield, which are primarily influenced by variations in the thermal evolution of source rocks in the Cambrian Yuertusi Formation in different areas of the oilfield. The evolutionary processes of the Cambrian source rocks and the timing of tectonic activities in the platform area exhibit temporal and spatial correlations with the four phases of hydrocarbon charging. These research findings contribute to an enhanced understanding of the hydrocarbon accumulation mechanism and hydrocarbon enrichment regularity of deep to ultra-deep carbonate reservoirs.

Key words: fluid inclusion; isotope dating; deep oil and gas; carbonate rock; Tarim Basin

引用:黄亚浩,汪如军,文志刚,张银涛,崔仕提,李梦勤,王彭,何涛华.塔里木盆地富满油田深层—超深层油气成藏过程[J].石油学报,2024,45(6):947-960.

Cite: HUANG Yahao, WANG Rujun, WEN Zhigang, ZHANG Yintao, CUI Shiti, LI Mengqin, WANG Peng, HE Taohua. Hydrocarbon accumulation process of the deep to ultra deep reservoirs in Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(6): 947-960.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42302154, No. 42272160)资助。

第一作者:黄亚浩,男,1990年12月生,2018年获中国地质大学(武汉)博士学位,现为长江大学资源与环境学院副教授,主要从事深层油气成藏研究工作。Email:hyhtr08916@163.com

通信作者:文志刚,男,1965年7月生,1997年获中国地质大学(北京)博士学位,现为长江大学资源与环境学院教授,主要从事油气地球化学、油气成藏与富集规律研究工作。Email:wzgz28@sina.com

近年来,塔里木盆地深层—超深层碳酸盐岩领域获得重大油气勘探突破,累计油气产量当量突破 $1000 \times 10^4 \text{t}$,油气埋深普遍超过 7500m,成为中国最大的超深层油气生产基地^[1-2]。富满油田是近 10 年来塔里木盆地最大的油气勘探发现,已建成目前中国 7500m 以深规模最大、开发效益最好的油田,探明油气资源量超过 $10 \times 10^8 \text{t}$ ^[3],产能超过 $300 \times 10^4 \text{t/a}$,是目前中国深地领域油气能源上产速度较快的油田。塔里木盆地属于多旋回叠合盆地,其油气藏的地层时代古老,盆内广泛发育的小尺度走滑断裂具有平面分段^[4]、垂向分层和多期活动性^[5-7]等特征,对油气的差异聚集和富集具有明显的控制作用^[1,8-9],这些原因导致盆地深层碳酸盐岩的油气成藏过程极其复杂。前人对塔里木盆地顺北、跃参和塔河等地区深层油气的成藏期次、成藏年代学等开展了大量系统工作^[10-13],总体认为台盆区存在 3 期油气充注过程,包括加里东期、海西期、燕山期—喜马拉雅期^[14],但富满油田深层油气的成藏过程鲜有报道,需要系统研究。

笔者以塔里木盆地富满油田北部奥陶系缝洞型油藏为研究对象,聚焦“断控”环境下流体-成藏耦合关

系、多期油气成藏过程中的年代学判识等关键科学问题,以赋含原生油包裹体的脉体为样品,结合微区 U-Pb 碳酸盐同位素定年关键技术,综合岩相学、荧光光谱分析和显微热力学分析,精细厘定了富满油田深层奥陶系储层中油气的多期动态成藏过程。

1 地质概况

富满油田位于塔里木盆地北部拗陷的阿瓦提拗陷—满加尔拗陷过渡带(阿—满过渡带),北接塔北隆起,南邻塔中隆起,东、西分别为满加尔拗陷和阿瓦提拗陷[图 1(a)],形态上总体呈马鞍状^[15],该地区虽经历多期构造活动,但长期处于南、北两大隆起区之间的构造低部位。富满油田北部包括哈得地区、玉科地区、跃满地区、富源地区,南部包括果勒地区和满深地区。

阿—满过渡带奥陶系发育完整,由下往上依次发育蓬莱坝组、鹰山组、一间房组、吐木休克组、良里塔格组和桑塔木组,主力油气产层为鹰山组二段(鹰二段)—一间房组^[16][图 1(b)、图 1(c)]。构造演化上:加里东早期,塔里木盆内整体处于伸展应力环境,阿—满过渡带发生沉降;加里东中—晚期(中奥陶世),盆内

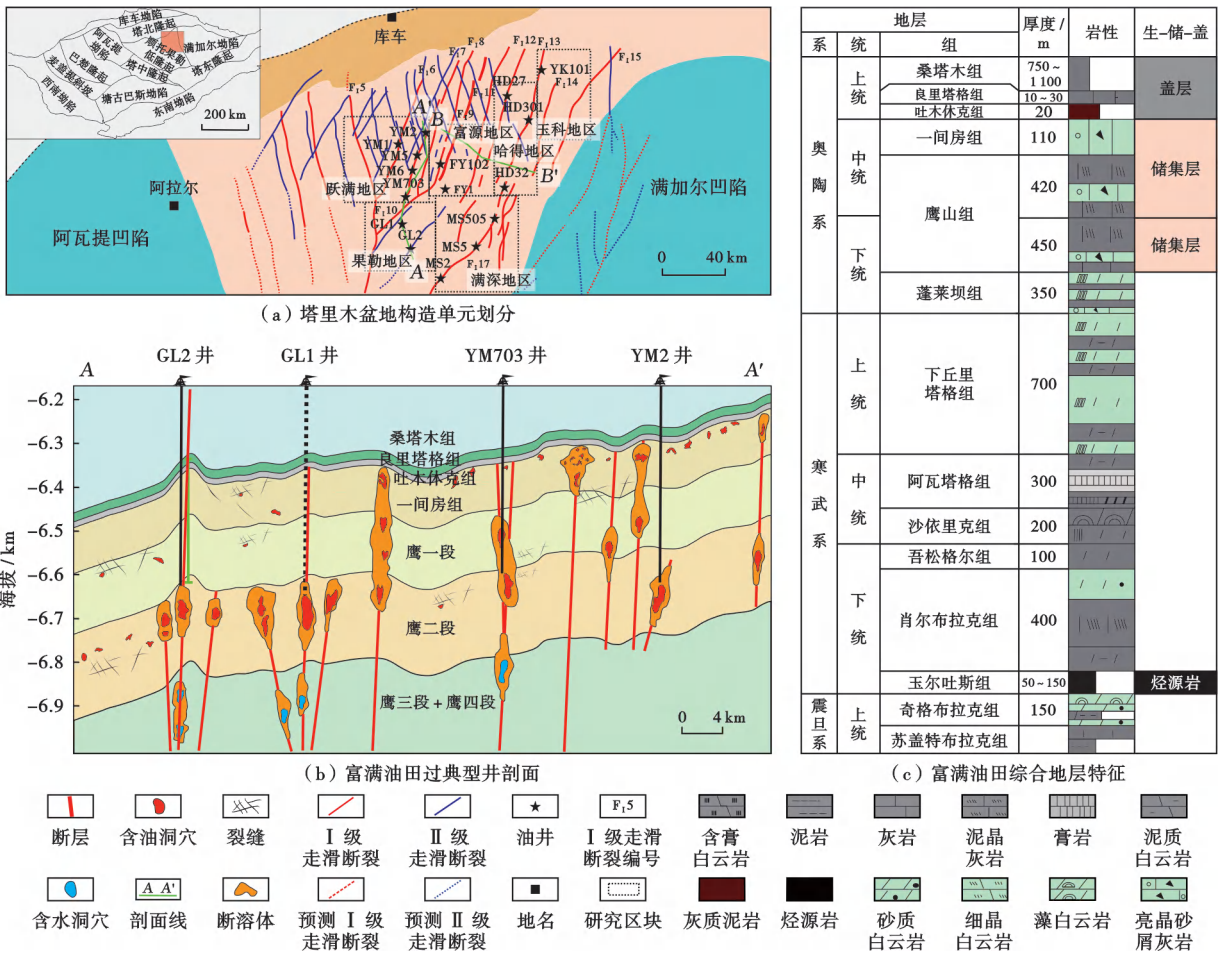


图 1 塔里木盆地富满油田构造特征和综合地层特征
Fig. 1 Tectonic characteristics and composite stratigraphic characteristics of Fuman oilfield in Tarim Basin

整体处于挤压应力环境并持续至海西早期(泥盆纪),阿—满过渡带也发生持续强烈挤压;海西中—晚期(石炭纪—二叠纪),塔北隆起发生持续挤压抬升,阿满过渡带也发生抬升;印支期—燕山期(三叠纪—白垩纪),盆地周缘构造相对稳定,阿—满过渡带整体处于稳定沉降,并在喜马拉雅期(古近纪—第四纪)定型。阿—满过渡带走滑断裂活动强烈^[17],在地震剖面上断裂特征清晰且基底发育一系列前寒武系基底裂陷构造,整体具有明显的分层变形结构^[18][图 1(b)]。

关于塔里木盆地早古生代海相主力烃源岩的研究经历了长期争论,但自中深 1 井、轮探 1 井寒武系获得突破以来,对于主力烃源岩为下寒武统玉尔吐斯组的认识已趋于一致^[19-20]。近年来的研究及勘探实践表明:玉尔吐斯组烃源岩在阿—满过渡带厚度大,并在垂向上叠置了走滑断裂断控型储层和厚层桑塔木组泥岩盖层;通过走滑断裂沟通烃源岩,整体可构成“寒武系供烃、走滑断裂垂向输导、多期成藏、晚期为主、断裂控富”的油气成藏体系^[21-22],具有极大的油气勘探潜力^[23]。目前,在塔北隆起、顺托果勒低隆起、塔中隆起自北向南已识别出多个走滑断裂体系,基本明确深层—超深层断溶体油气藏的规模储集空间为与走滑断

裂带叠加改造相关的各类碳酸盐岩储集体,具有纵向连通性强、横向可延展的特征^[24-25]。前人的研究也基本明确了碳酸盐岩地层在多期活动的走滑断裂作用下可形成断控洞穴、裂缝及沿裂缝溶蚀的“断溶体”储层,断裂具有明显的“控储、控藏、控富”特征。在盆地斜坡区、坳陷区等表生岩溶作用欠发育的地区,深部流体可以通过走滑断裂和内幕界面等对储层进行改造,从而形成与走滑断裂多期活动相关的缝洞型储集体,有效拓展塔里木盆地海相地层的油气勘探空间^[26-27]。富满油田不同断裂带的油气性质及成熟度差异较大^[28],反映其油气充注成藏过程非常复杂。

2 技术方法

实验样品来自富满油田跃满地区 F₁7 断裂带 YM2 井、YM5 井、YM6 井和 YM703 井,富源地区 F₁9 断裂带 FY102 井和 FY1 井,哈得地区 F₁12 断裂带 HD27 井、HD301 井等井,玉科地区 F₁13 断裂带 YK101 井,果勒地区 GL1 井和 GL2 井,以及满深地区 F₁17 断裂带 MS505 井、MS5 井和 MS2 井。

笔者在典型井中选取了具有溶蚀孔洞充填和裂缝充填脉体的一间房组岩心样品(图 2),将样品磨制成

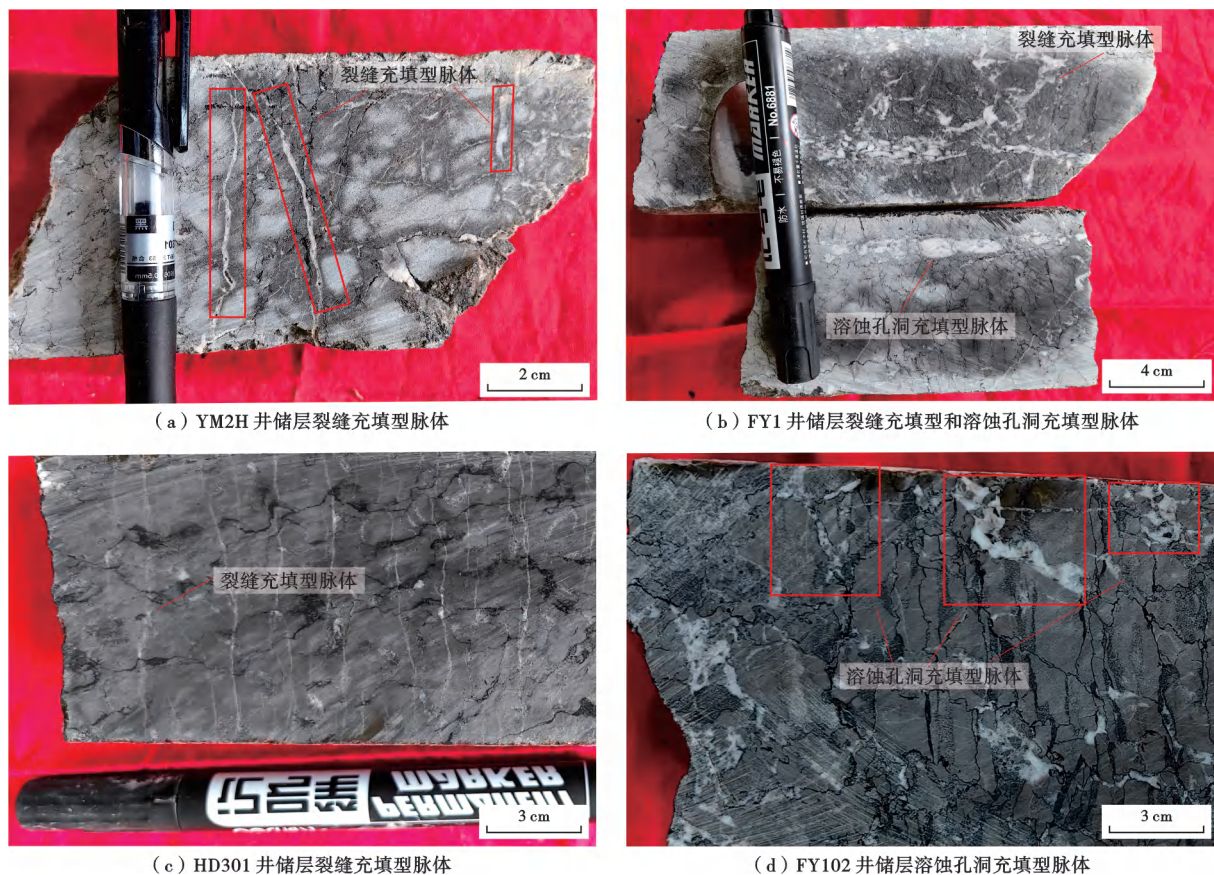


图 2 典型井一间房组充填型脉体的发育特征

Fig. 2 Development characteristics of filled-type veins in typical wells in Yijianfang Formation

厚度为 80~100 μm 且双面抛光的包裹体片进行阴极发光分析、流体包裹体岩相学观察及荧光光谱分析。流体包裹体岩相学观察和荧光光谱分析在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成,采用的仪器为 NIKON-LV100 型双通道荧光-透射光显微镜,荧光滤色片类型选择紫外荧光激发模块,紫外荧光的波长范围是 300~365 nm,荧光光谱由 Maya2000Pro 型显微荧光光谱分析仪获得。阴极发光测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用的仪器为英国 CL8200-MK5 型阴极发光仪。

微区原位碳酸盐 U-Pb 定年在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室完成,所用仪器为四级杆等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)。测试过程中将方解石靶样置于 Laurin Technic 型样品室,并用激光对样品表面进行扫描,选择合适的区域开展 U-Pb 同位素定年。为提高 Q-ICP-MS 的灵敏度,采用的激光束斑直径为 100 μm ,能量密度设为 3 J/cm²,剥蚀频率为 10 Hz,并在氦气中加入适量的氩气和氮气作为载气,样品剥蚀方式采用单点剥蚀,单点剥蚀包括 20 s 的背景采集时间、25 s 的数据收集时间和 10 s 的样品清洗时间。笔者在方解石靶样表面选择了 20~30 个点进行微区原位微量元素测试,处理后获得不同点的²³⁸U 含量、²⁰⁸Pb 含量、²⁰⁷Pb 含量和²⁰⁶Pb 含量,以及²³⁸U/²⁰⁶Pb 比值。挑选出²³⁸U/²⁰⁶Pb 比值高且²⁰⁶Pb 含量低的点位,在其附近密集打点进行激光原位 U-Pb 同位素定年测试,以获取更精确的年龄数据。以玻璃标样 NIST612 中⁴³Ca 作为内标来校正样品的微量元素含量,标样 NIST614 用于校正仪器灵敏度的漂移及²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值。昆士兰大学放射性同位素实验室对塔里木盆地阿克苏地区下寒武统孔洞充填方解石晶体 AHX-1 进行了近千组次测试,将 AHX-1[其年龄加权平均值为(209.8 ± 1.3)Ma]作为标样来校正²³⁸U/²⁰⁶Pb 比值,得到了稳定且可靠的微量元素及 U-Pb 年龄数据。笔者采用 Iolite 3.4 软件处理微量元素含量以及²³⁸U/²⁰⁶Pb 和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 等相关实验数据,用 Isoplot 3.0 软件计算年龄并绘制 Terra-Wasserburg 协和图^[29-30]。

3 实验结果

3.1 方解石脉体类型

根据岩心手标本观察和岩石薄片鉴定,结合阴极发光和 U-Pb 同位素定年综合分析认为:富满油田鹰山组一段(鹰一段)、鹰二段和一间房组的岩性主要为泥晶灰岩、砂屑灰岩、砂屑泥晶灰岩和白云岩等(图 2);储层中溶蚀孔洞和裂缝脉体发育,其中,脉体多为方解石或

白云石,表现为全充填或半充填;奥陶系碳酸盐岩缝洞型脉体在不同区域主要存在 3 期成岩胶结作用[图 3(a)—图 3(c)]。第 1 期方解石脉体(Cal-I)在富满油田广泛发育,脉体边缘不平直,延伸不远,裂缝宽度为 0.2~0.5 cm;该期脉体与围岩直接接触,晶体粒度大小不一,无明显重结晶作用,具有明显的交代残余结构,阴极发光多表现为不发光—弱发光特征[图 3(a)]。第 2 期方解石脉体(Cal-II)多为细晶结构,可见部分重结晶组分,阴极发光表现为亮红色的强阴极发光特征(图 3),可见沥青充填微裂缝。第 3 期方解石脉体(Cal-III)的形成晚于前两期方解石脉体,结合脉体的透射光和阴极发光分析可见 3 期脉体存在交切关系[图 3(e)];该期脉体仅在部分井的储层样品中可见,脉体分布不均匀,其阴极发光表现为弱发光特征,可见早期沥青缝合线充填物。岩相学观察和阴极发光分析显示,裂缝充填脉体和溶蚀孔洞脉体存在多期充填特征,充填物主要为暗红色阴极光或不发光的方解石。富满油田储层中的脉体与围岩阴极发光的颜色基本一致,CaI-II 和 CaI-III 的阴极发光颜色基本一致,但两期脉体的 U-Pb 同位素定年结果不同。

3.2 流体包裹体特征

在富满油田储层的裂缝充填和溶蚀孔洞充填型脉体内,大量发育多种类型的含油气流体包裹体,不同荧光特征的原生油包裹体赋存于不同期次的方解石脉体中。包裹体的形状有椭圆形、菱形、长条形和不规则形等,直径一般在 1~18 μm 。室温下,通过透射光观察可见气液两相的烃类(油)包裹体、气液两相的盐水包裹体以及气相为主的富气包裹体。次生气液两相的油包裹体呈串珠状沿裂隙排列[图 4(a)]。结合荧光和透射光观察可见,方解石脉中沿结晶生长纹发育原生黄绿色荧光油包裹体[图 4(b)]以及不同产状的具有原生和次生特征的蓝绿色、蓝白色以及蓝色荧光油包裹体[图 4(c)],而在半充填的方解石脉体的孔隙中可见固体沥青[图 4(d)]。图 4(e)和图 4(f)中的蓝白色荧光油包裹体呈孤立状分布,为原生成因,附近可见沿愈合裂隙发育的次生成因含气包裹体[图 4(f),不发光]。原生黄绿色荧光油包裹体主要赋存在 Cal-I 内,原生蓝绿色荧光油包裹体赋存在 Cal-II 内,蓝白色荧光油包裹体赋存在 Cal-III 内,富满油田果勒地区和满深地区的蓝色荧光油包裹体主要赋存在 Cal-III 内。

荧光光谱分析得到的荧光主峰波长(λ_{max})和荧光参数(Q_{F535} ,其数值为荧光光谱曲线上光谱波长在 535~720 nm 间面积与在 420~535 nm 间面积之比值)可用于揭示储层中捕获古原油的成熟度。Ping 等^[31-32]总结了烃源岩不同生烃阶段及其对应油包裹体的荧光特

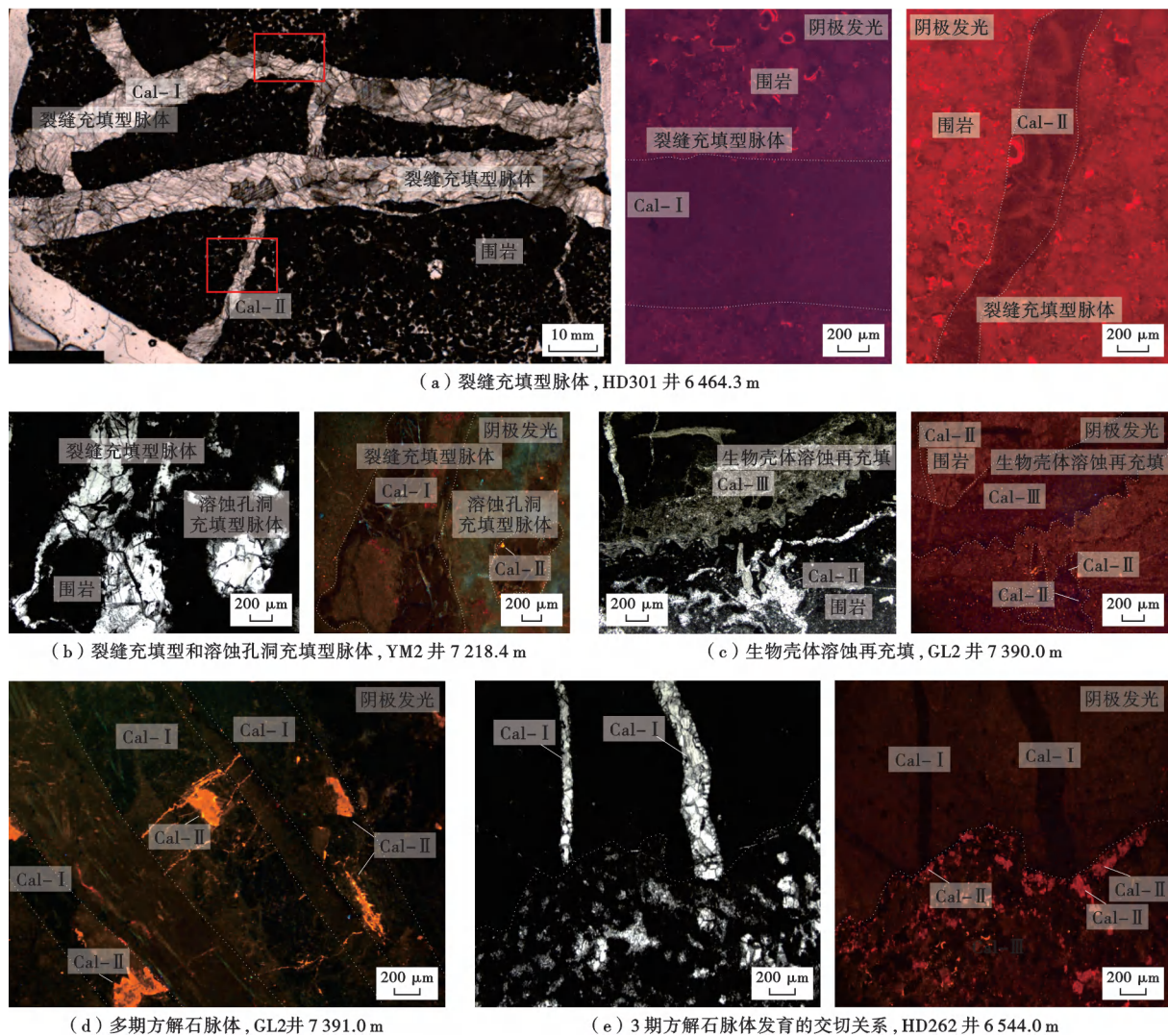


图3 一间房组裂缝充填型和溶蚀孔洞充填型脉体透射光全景照片及阴极发光照片

Fig. 3 Panoramic photomicrographs and cathodoluminescence images of fracture-filled veins and calcite veins filling dissolved pores

征。利用 λ_{\max} — Q_{F535} 图版进行投点(图5),结合不同生烃阶段的荧光光谱参数可进行等效镜质体反射率(R_{or})划分。为了保证能够真实反映单个包裹体的荧光特征,笔者选择未经明显后期改造或拉伸泄漏的油包裹体作为研究对象。富满油田奥陶系储层中的油包裹体共检测到4种不同荧光颜色(波长范围)的烃类包裹体:黄绿色荧光油包裹体(λ_{\max} 为523~553 nm, Q_{F535} 为1.41~1.91);蓝绿色荧光油包裹体(λ_{\max} 为500~525 nm, Q_{F535} 为0.83~1.97);蓝白色荧光油包裹体(λ_{\max} 为485~500 nm, Q_{F535} 为0.73~1.55);蓝色荧光油包裹体(λ_{\max} 为461~480 nm, Q_{F535} 为0.91~1.72)。

3.3 流体包裹体的均一温度、盐度和组分特征

富满油田深层奥陶系储层中含油气包裹体类型多样,油包裹体和盐水包裹体为不混溶体系下的捕获物^[33],与油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度可代表含油包裹体序列的捕获温度,并用于估算油气成藏时

间。笔者基于不同区域深层油气的荧光光谱分析结果对储层中不同类型的油包裹体进行了划分(图5),并分析不同地区与油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度。

(1) 跃满地区和富源地区

在YM2井7218.4 m和FY1井7382.1 m深度段,早期充填的方解石脉体内发育与原生黄绿色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体,其均一温度为60~70℃,而与次生蓝绿色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为90~100℃,与次生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为110~130℃,与次生气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为140~150℃[图6(a)、图6(b)]。在YM5井7308.2 m和YM703井7280.5 m深度段,奥陶系发育溶蚀孔洞充填脉体,脉体内与原生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为120~130℃,与次生气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为140~150℃[图6(c)、图6(d)]。

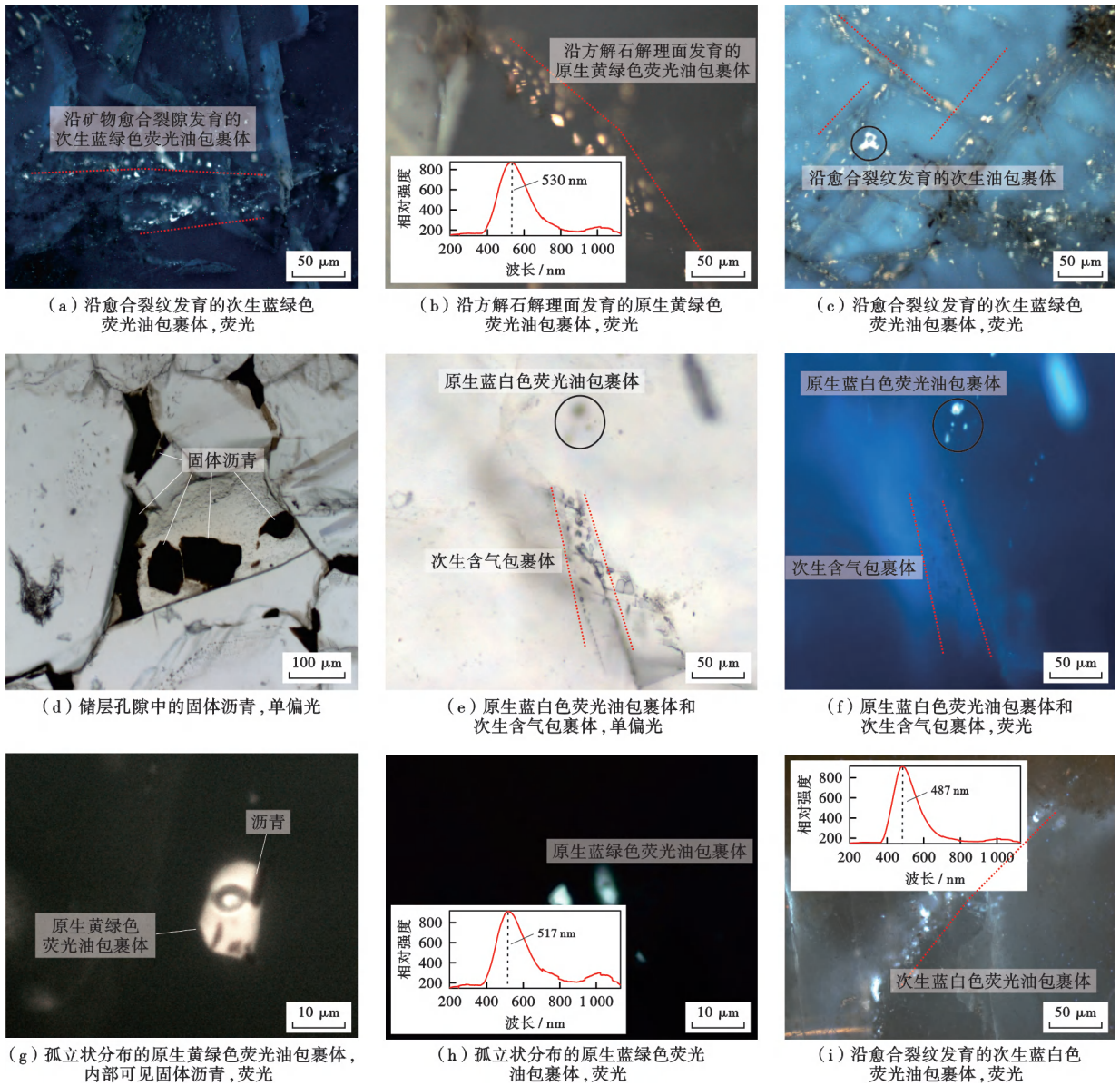


图4 富满油田一间房组流体包裹体岩相学特征

Fig. 4 Petrographic characteristics of fluid inclusions in Yijianfang Formation of Fuman oilfield

(2) 哈得地区

在 HD301 井 6 464.3 m 深度段, 裂缝脉体内与原生蓝绿色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 100~110 °C, 与次生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 120~130 °C, 与次生气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 130~140 °C [图 6(e)]。

(3) 玉科地区

YK1 井 6 677.9 m 深度段, 脉体内与原生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 130~140 °C, 与次生气包裹体伴生盐水包裹体的均一温度为 140~150 °C [图 6(f)]。

(4) 果勒地区

GL2 井 7 391.0 m 深度段奥陶系发育溶蚀孔洞充填脉体, 脉体内与原生蓝绿色荧光油包裹体伴生的盐

水包裹体的均一温度为 120~130 °C [图 6(g)]。在 GL2 井 7 391.0 m 和 GL1 井 7 322.0 m 深度段, 脉体内与次生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 130~140 °C, 与次生气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 130~140 °C [图 6(g)、图 6(h)]。

(5) 满深地区

MS5 井 7 605.7 m 深度段奥陶系发育溶蚀孔洞充填脉体, 脉体内与原生蓝白色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 120~130 °C, 与次生蓝色荧光油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 120~130 °C, 与次生气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度为 130~140 °C [图 6(i)]。

富满油田奥陶系储层中发现大量气相包裹体, 多为次生成因。激光拉曼光谱分析表明, 气相包裹体的组分

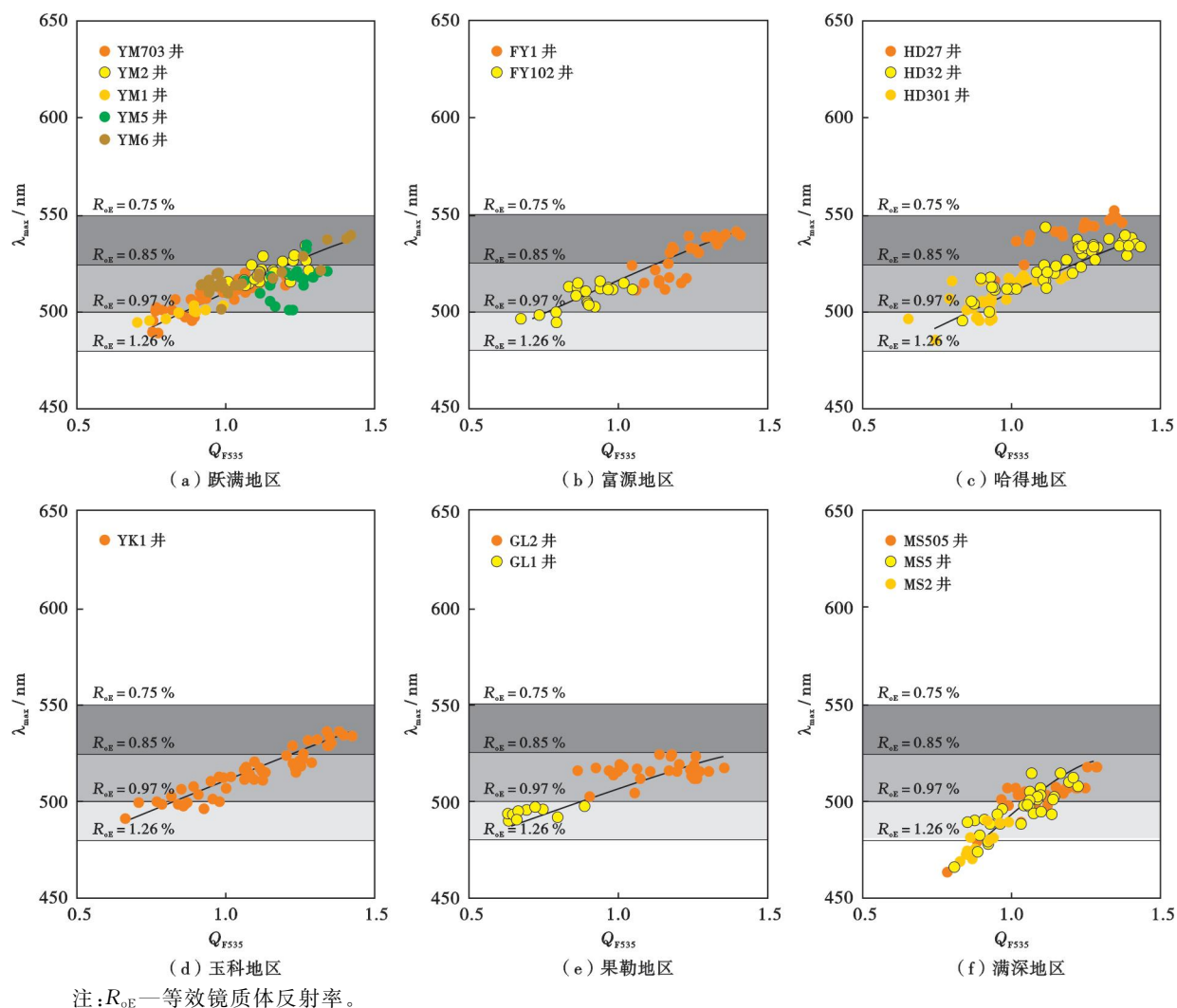


图 5 富满油田奥陶系储层油包裹体荧光光谱的 λ_{\max} 和 Q_{F535} 交汇

Fig. 5 Cross plots of λ_{\max} and Q_{F535} of fluorescence spectra for oil inclusions in the Ordovician reservoirs of Fuman oilfield

为甲烷气流体包裹体(图 7);岩相学证据表明,大量次生气包裹体的捕获时间晚于油包裹体。基于与油、气包裹体伴生的盐水包裹体冰点对应的盐度来分析,其结果表明,富满油田盐水包裹体的盐度主要分布在 8.4%~13.2%,均一温度和盐度无明显的相关性(图 8)。

4 讨论

4.1 包裹体类型

塔里木盆地奥陶系的油气来源于寒武系玉尔吐斯组烃源岩^[19-20]。烃源岩特征及其热演化过程影响着储层中充注原油和捕获油包裹体的成熟度。构造-热演化史和埋藏史显示,富满油田寒武系烃源岩和奥陶系储层在地质历史时期表现为连续埋深且未出现大规模调整、抬升过程^[34-35],油气藏未经明显调整改造,因此单一烃源岩的生、排烃属性决定了储层中的油气充注必然是一个从低成熟到高成熟的过程^[35]。笔者通过投点分析建立了烃源岩不同生烃阶段与油包裹体荧光波长的关系。从富满油田不同工区储层中油包裹体

的荧光光谱分析结果来看,北部工区与南部工区的成藏过程存在明显的差异,结合研究区寒武系烃源岩的生烃演化特征,可进一步划分出不同生烃阶段对应形成的油包裹体类型。

图 5 显示,跃满地区、富源地区、哈得地区、玉科地区(富满油田北部)的油包裹体主要分为 3 类:黄绿色荧光油包裹体的 R_{oE} 为 0.75%~0.85%,其捕获时间对应于在寒武系烃源岩浅埋藏的生油早期阶段;蓝绿色荧光油包裹体的 R_{oE} 为 0.85%~0.97%,其捕获时间对应于在寒武系烃源岩中等埋藏的主生油期阶段;蓝白色荧光油包裹体的 R_{oE} 为 0.97%~1.26%,其捕获时间对应于在寒武系烃源岩深埋藏的生油晚期阶段。果勒地区(富满油田南部)的油包裹体类型主要为蓝绿色和蓝白色荧光油包裹体,其捕获时间对应于在寒武系烃源岩的主生油期(R_{oE} 为 0.85%~0.97%)和生油晚期(R_{oE} 为 0.97%~1.26%)。满深地区(富满油田南部)的油包裹体主要分为 3 期,相较于果勒地区,可观测到更晚期捕获的高成熟蓝色荧光油包裹体,其捕获时间为寒武

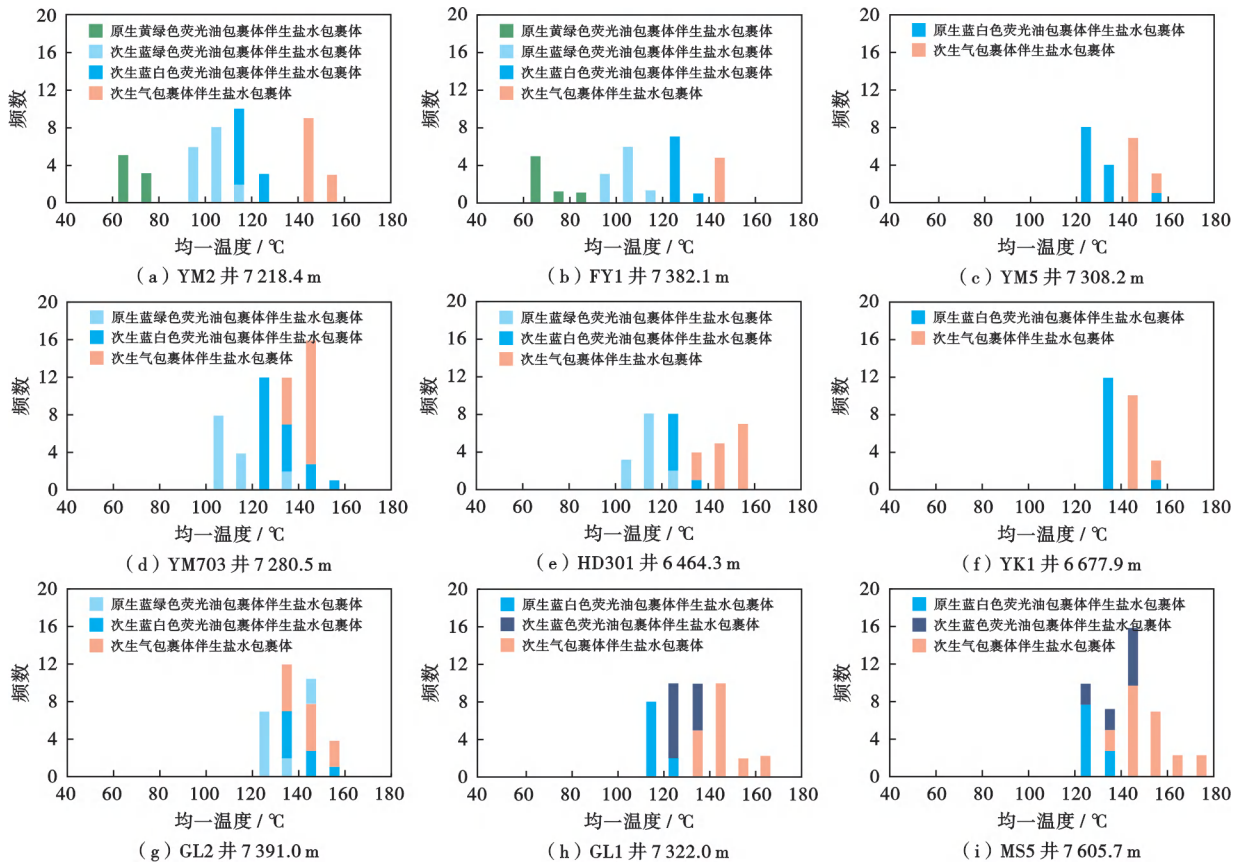


图6 富满油田奥陶系储层流体包裹体均一温度分布

Fig. 6 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in the Ordovician reservoirs of Fuman oilfield

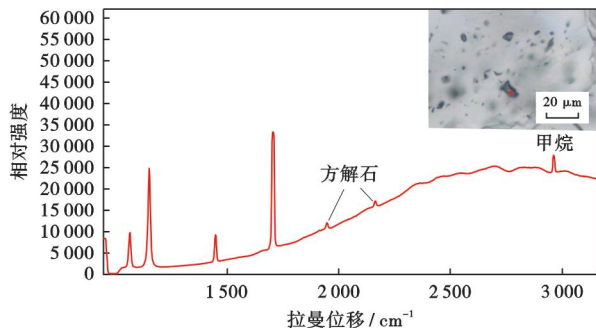


图7 富满油田GL2井奥陶系储层天然气包裹体的激光拉曼光谱

Fig. 7 Laser Raman spectra of natural gas inclusions in the Ordovician reservoir of Well GL2 in Fuman oilfield

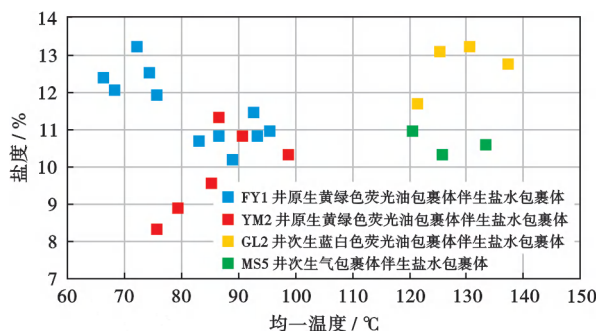


图8 富满油田奥陶系储层流体包裹体盐度与均一温度关系
Fig. 8 Relationship of salinity and homogenization temperature of fluid inclusions in the Ordovician reservoirs of Fuman oilfield

系烃源岩生湿气阶段($R_{OE} > 1.26\%$)。满深地区比跃满地区、哈得地区等更靠近满加尔凹陷,推测早期烃源岩在快速埋深阶段经历了更高的古地温,是造成早期生油成熟度较高的原因。不同区域的寒武系烃源岩在热演化程度上存在差异。

4.2 深层油气成藏过程

在确定油气充注时间的研究中,常用的成藏期次分析手段是将与油包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度投点到盆地埋藏史-热演化史图中,这一方法由于受多旋回叠合沉积盆地发展历程、多源多期生/排烃过程、油气多期充注成藏以及后期调整等多方面因素影响,成藏时间往往存在多解性,因而方法存在局限性。通过对碳酸盐脉体开展微区原位 U-Pb 定年,结合原生发育的包裹体类型分析,可以精确厘定油气充注的绝对成藏年代。图9(a)显示了FY1井奥陶系储层中两期裂缝脉体的交切关系,脉体交叉点的穿插关系表明 Cal- II 的充填时间晚于 Cal- I。镜下包裹体的岩相学观察和同位素定年分析表明:Cal- I 中发育沿矿物解理方向展布的原生黄绿色荧光油包裹体,脉体方解石的定年结果显示该期油充注时间为 $(459.0 \pm 7.2)\text{Ma}$ (加里东中期);Cal- II 中可见孤立发育的原生蓝绿色荧光油包裹体,脉体方解石的定年结果显示该期油充注时间为 $(274.6 \pm 3.7)\text{Ma}$ (海

西晚期)。图 9(b)显示 YM703 井奥陶系储层的裂缝充填脉体中发育典型的孤立状原生蓝绿色荧光油包裹体,脉体方解石的定年结果显示该期油充注时间为(346.1 ± 5.3)Ma(海西中期)。图 9(c)显示 GL2 井奥陶系储层的裂缝充填脉体中发育典型的孤立原生蓝白色荧光油包裹体,脉体方解石的定年结果显示该期油充注时间

为(217.6 ± 8.4)Ma(印支期—燕山早期)。在大量岩相学观察中尚未发现赋含原生产状气包裹体的脉体,因而无法通过 U-Pb 同位素定年获得天然气的主要充注时间,但通过与气包裹体伴生的盐水包裹体均一温度(140~150 °C)投点,可得到天然气的主要充注时期在燕山晚期—喜马拉雅期(90~20 Ma)。

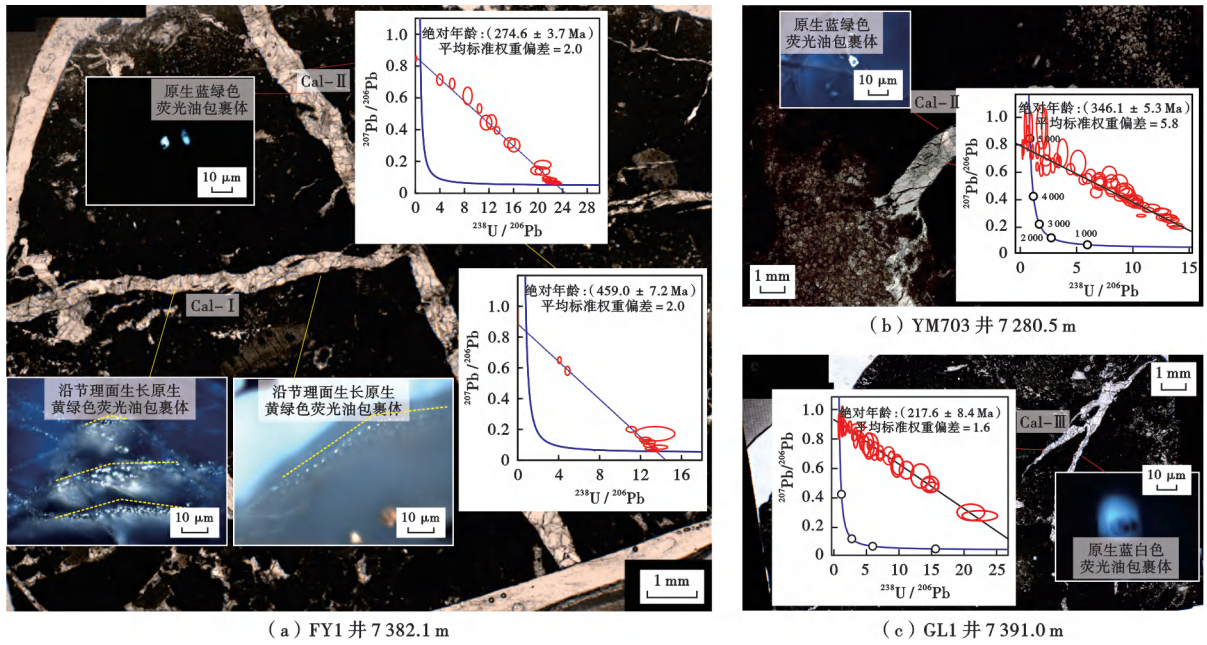


图 9 原生不同荧光油包裹体的裂缝脉体的年代学信息和岩相学照片

Fig. 9 Geochronological information and petrographic images of fracture veins with primary different fluorescent oil inclusions

表 1 为富满油田典型井中一间房组储层脉体方解石(含不同类型原生产油包裹体)的定年结果。年代学分析表明,富满油田的油气成藏在不同区域存在明显差异(图 10)。北部跃满地区、富源地区、哈得地区和玉科地区存在 3 期原油充注:第 1 期原油充注在加里东中期(473.3~447.4 Ma);第 2 期原油充注在海西中—晚期(348.2~273.9 Ma);第 3 期原油充注在印支—燕山早期(217.6~205.2 Ma)。南部果勒地区、满深地区主要存在 3 期原油充注:第 1 期原油充注在加里东中期,所捕获的油包裹体发蓝绿色荧光;第 2 期原油充注在海西中期,该时期捕获的油包裹体发蓝白色荧光;第 3 期原油充注在燕

山早期,所捕获的油包裹体发蓝色荧光。由于未观测到赋含原生气包裹体的方解石脉体,因而无法采用 U-Pb 定年方法确定天然气的充注时间。笔者基于与气包裹体伴生的盐水包裹体的最小均一温度(138.2~146.5 °C)分析,天然气大规模充注发生在燕山晚期—喜马拉雅期(90~20 Ma)(图 11)。

总而言之,富满油田奥陶系深层碳酸盐岩油气藏存在 4 期油气充注,其中,加里东中期、海西中—晚期以及印支—燕山早期是原油充注的主要时期,大规模天然气充注发生在喜马拉雅期。在富满油田南、北区域,前 3 期充注原油的成熟度存在明显差异(图 10)。

表 1 富满油田脉体 U-Pb 同位素定年及原生包裹体发育情况

Table 1 U-Pb isotope dating of veins and development of primary inclusions in Fuman oilfield

井号	深度/m	脉体类型	原生产油包裹体荧光颜色	均一温度/°C	U-Pb 同位素年龄/Ma	成藏期
FY1	7382.1	裂缝	黄绿色	60.5~65.2	459.0 ± 7.2	加里东中期
YM2	7218.4	溶蚀孔洞	黄绿色	62.4~67.4	449.9 ± 6.1	加里东中期
MS505	7378.6	溶蚀孔洞	蓝绿色	77.5~79.6	447.4 ± 2.9	加里东中期
HD301	6464.3	裂缝	蓝绿色	107.2~109.3	348.2 ± 3.1	海西中期
YM703	7280.5	溶蚀孔洞	蓝绿色	105.6~109.4	346.1 ± 5.3	海西中期
FY1	7382.1	裂缝	蓝绿色	117.2~119.6	274.6 ± 3.7	海西晚期
YM5	7308.2	裂缝	蓝绿色	126.5~127.3	273.9 ± 8.3	海西晚期
GL2	7391.0	裂缝	蓝白色	131.6~135.4	217.6 ± 8.4	印支期—燕山早期
YK1	6677.9	溶蚀孔洞	蓝白色	132.5~134.6	205.2 ± 3.1	印支期—燕山早期
MS5	7605.7	裂缝	蓝色	135.2~137.4	201.3 ± 5.6	印支期—燕山早期

笔者分析了前人在塔里木盆地台盆区的定年工作;王斌等^[36]和杨毅等^[37]对顺北5号断裂带、顺北1号断裂带开展了方解石脉烃类包裹体分析,提出油气成藏在加里东晚—海西早期、印支期;李慧莉等^[38]对顺托果勒低隆起做了大量U-Pb同位素定年分析,认为3期脉体主要形成于加里东中期、加里东晚—海西早期和海西晚期;徐豪等^[39]的U-Pb定年和包裹体分析认为,塔河油田奥陶系储层共存在4期油充注,分别对应加里东期、海西期、印支期和燕山期构造运动,其中,前3期油充注时间与3期方解石脉体的形成时间一致,第4期油充注发生在3期方解石脉形成之后。顺北地区、塔河地区、富满地区都属于塔里木盆地台盆区重要的深层勘探区域,但由于台盆区的油气相态在平面上差异明显,不同区域的油气成藏过程具有差异。

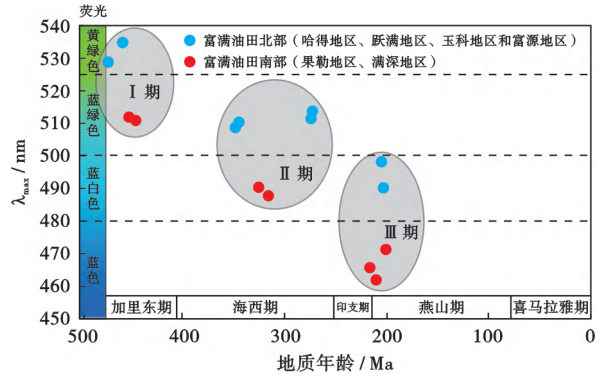


图10 富满油田脉体U-Pb同位素定年与脉体赋存原生包裹体荧光波长的关系

Fig. 10 Relationship of U-Pb isotope dating and fluorescence wavelength of primary inclusions in veins in Fuman oilfield

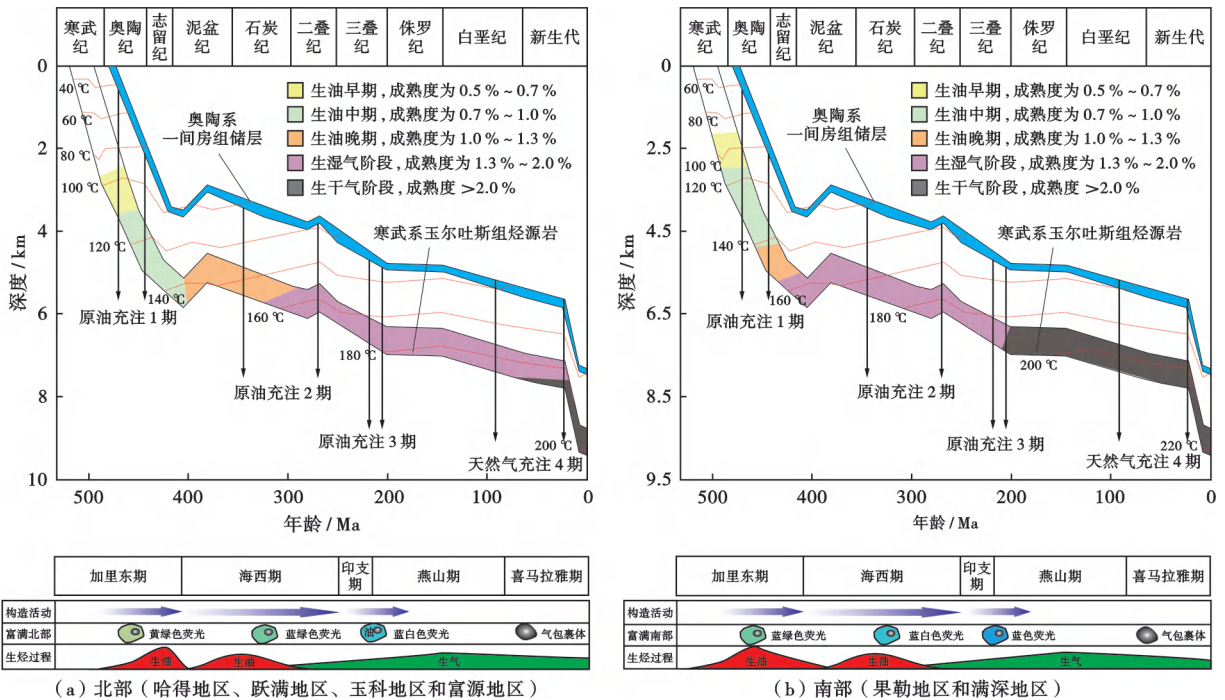


图11 富满油田埋藏史-热演化史及油气成藏期次

Fig. 11 Burial-thermal evolution history and hydrocarbon accumulation periods of Fuman oilfield

基于前人已发表的古地温和剥蚀量数据^[40]开展模拟,获得了富满油田的埋藏史-热演化史(图11)。分析结果表明:在距今490 Ma,玉尔吐斯组烃源岩的成熟度达0.5%,进入生烃门限;在距今460 Ma,玉尔吐斯组烃源岩的成熟度达0.7%,进入主要生油阶段。玉尔吐斯组烃源岩分别在距今420 Ma和约340 Ma时达到第1次和第2次生烃高峰,在距今约300 Ma时主要生油阶段结束,进入生凝析油和湿气阶段。在距今80 Ma时,玉尔吐斯组烃源岩的成熟度达2.0%,进入生干气阶段。富满油田南、北区域油气藏的成藏期次和充注时间基本一致,但南部区域充注原油的成熟度偏高,受寒武系烃源岩所处的不同热演化阶段控制。

寒武系玉尔吐斯组烃源岩在加里东中期和海西中—晚期原油充注的时空分布与烃源岩的两次大规模生油阶段相匹配。塔里木盆地台盆区的构造活动主要分为3期(图11),3期原油充注与3期构造活动时间匹配,走滑断裂体系的持续活动对于奥陶系深层原油充注具有重要作用。

塔里木盆地台盆区的断裂活动经历了多期继承性演化,包括加里东晚期、海西早—晚期、印支期—燕山早期以及喜马拉雅期。走滑断裂带最早形成于中奥陶世,初期呈现为直立的线性断裂,规模相对较小[图12(a)];该时期储层埋藏浅且受大气淡水淋滤作用强烈影响,导致缝洞型储层广泛发育。随着中奥陶世末期下寒武

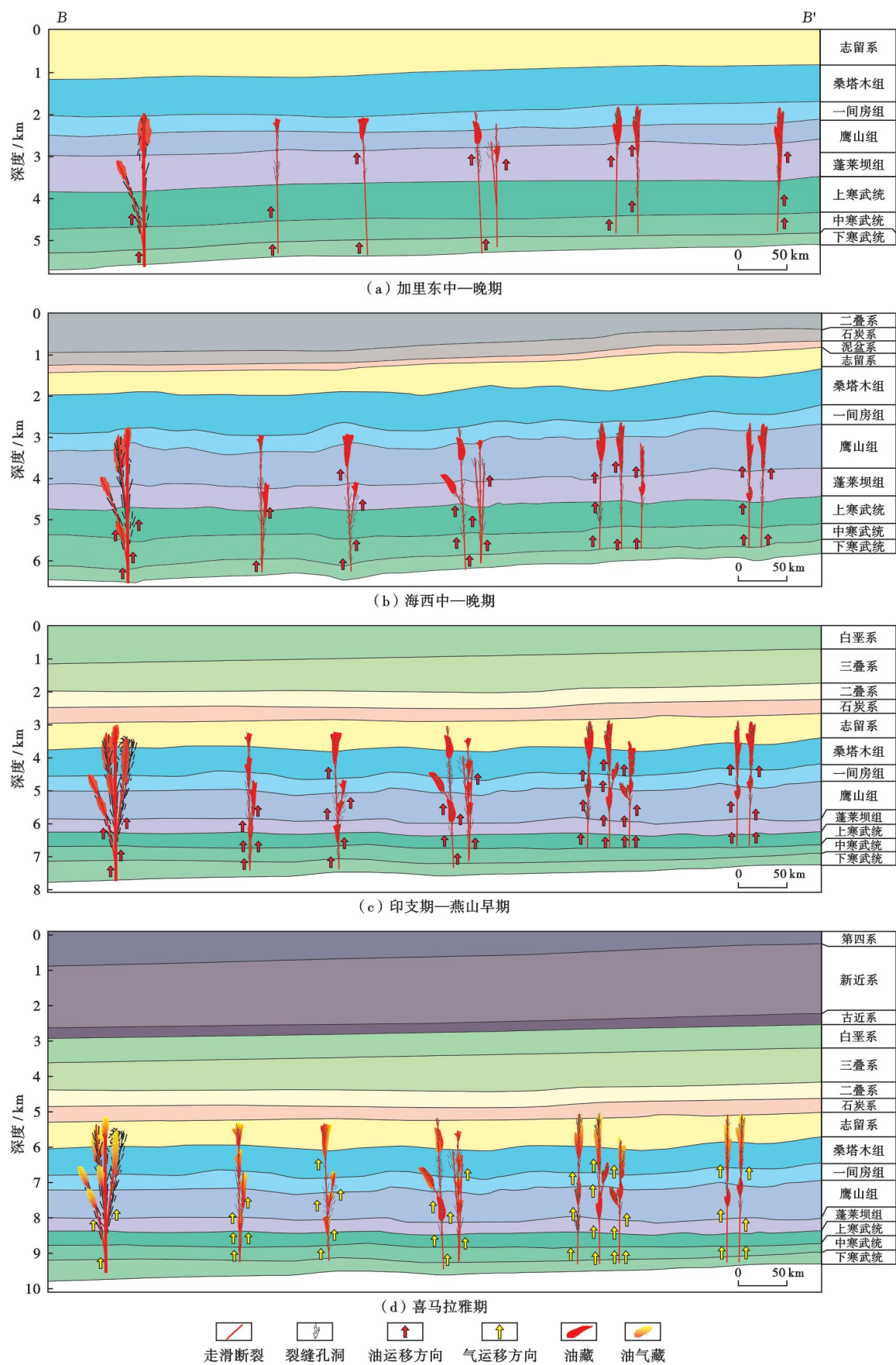


图 12 富满油田不同关键成藏期地质结构演化(剖面位置见图 1)

Fig. 12 Geological structure evolution of different key accumulation periods in Fuman oilfield

统烃源岩进入第1次生烃高峰,液态烃沿着垂直断裂向上运移至中—上奥陶统,大量低成熟度原油充注进入储层。海西中期,部分构造抬升活动以及NW走向的走滑断裂再次活动,导致新的裂缝和孔洞形成,早期缝洞充填的方解石在构造作用下发生破裂。泥盆纪末期,构造抬升活动基本结束,此时玉尔吐斯组烃源岩也整体达到了成熟演化阶段,第2期油气沿着活跃的走滑断裂运移至奥陶系储层中聚集成藏[图12(b)]。印支期—燕山早期,断裂带再次活动,为深部地质流体和油气充注提供了关键的输导通道[图12(c)]。晚期,在喜马拉雅构造运动的影响下,塔里木盆地经历了显著的地质变革,台盆区迅速下沉,导致古油藏、烃源岩以及输导系统深埋,期间,油气充注和晚期具有更高成熟度的原油裂解气及干酪根降解气导致气侵强度不均一,油气藏大规模遭受大量干气注入,气侵强度呈现出东强西弱的特征^[41-44][图12(d)]。

5 结论

(1) 富满油田原生和次生含油包裹体的荧光光谱分析显示,北部跃满地区、富源地区、哈得地区、玉科地区油的包裹体类型可分为3类:寒武系烃源岩在浅埋藏生油早期形成黄绿色荧光油包裹体(R_{of} 为0.75%~0.85%)、在中等埋藏的主生油期形成蓝绿色荧光油包裹体(R_{of} 为0.85%~0.97%)、在中等埋藏的主生油晚期形成蓝白色荧光油包裹体(R_{of} 为0.97%~1.26%)。南部果勒地区和满深地区缺少生油早期形成的黄绿色荧光油包裹体,但可观测到更晚期捕获的高成熟度蓝色荧光油包裹体($R_{\text{of}} > 1.26%$)。

(2) 富满油田主要存在3期原油充注和1期天然气充注。第1期原油充注在加里东中期(473.3~459.0 Ma),寒武系烃源岩在该时期第1次达到生烃高峰,储层此时为浅埋藏,走滑断裂带表现为直立线性断裂;第2期原油充注在海西中—晚期(348.2~273.9 Ma),NW走向的走滑断裂再次活动,导致新的裂缝和孔洞形成,油气沿着继承性活动的走滑断裂运移至奥陶系储层中聚集成藏;第3期原油充注在印支期—燕山早期(217.6~205.2 Ma),早期断裂带再次活跃,为深部地质流体和油气充注提供了关键的输导通道。天然气的大规模充注发生在燕山晚期—喜马拉雅期(90~20 Ma),其中,喜马拉雅期古油藏和烃源岩的深埋导致大量天然气产生并伴随着强烈的气侵作用。富满油田南部与北部充注原油的成熟度和类型不同,这主要受控于不同区域寒武系烃源岩热演化过程的差异。

参 考 文 献

[1] 王清华,杨海军,汪如军,等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探,2021,26(4):

58-71.

WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.

[2] 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 Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971-985.

[3] 李建忠,陶小晚,白斌,等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):52-67.

LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 52-67.

[4] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识[J]. 石油勘探与开发,2019,46(3):552-558.

JIAO Fangzheng. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 552-558.

[5] 孔永吉,吴孔友,刘寅. 塔里木盆地顺南地区走滑断裂发育特征及演化[J]. 地质与资源,2020,29(5):446-453.

KONG Yongji, WU Kongyou, LIU Yin. Development characteristics and evolution of the strike-slip faults in Shunnan area, Tarim Basin[J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 446-453.

[6] 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.

[7] 邹光辉,马兵山,韩剑发,等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发,2021,48(3):510-520.

WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 510-520.

[8] 李开开,蔡春芳,蔡镭璐,等. 塔河油田下古生界溶洞充填巨晶方解石流体来源分析[J]. 地质科学,2010,45(2):595-605.

LI Kaikai, CAI Chunfang, CAI Liaolu et al. Fluid origin of cave-filling giant crystalline calcites in the Early Paleozoic in Tahe oilfield, Tarim Basin and the model of the fluid action [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(2): 595-605.

[9] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探,2020,25(3):83-95.

LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin—taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike-slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83-95.

[10] 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.
- [11] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 102-111.
- QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [12] 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.
- [13] 李斌, 赵星星, 邬光辉, 等. 塔河南奥陶系多相态油气藏成因及富集模式[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 657-672.
- LI Bin, ZHAO Xingxing, WU Guanghui, et al. Study on the origin and accumulation model of ordovician multiphase oil and gas reservoirs in South Tahe Area[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 657-672.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272-282.
- TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 272-282.
- [17] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.
- [18] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. 科学通报, 2002, 47(S1): 1-8.
- JIA Chengzao, WEI Guoqi. Structural characteristics and petroliferous features of Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 1-11.
- [19] 李峰, 朱光有, 吕修祥, 等. 塔里木盆地古生界海相油气来源争议与寒武系主力烃源岩的确定[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1417-1436.
- LI Feng, ZHU Guangyou, LÜ Xiuxiang, et al. The disputes on the source of Paleozoic marine oil and gas and the determination of the Cambrian System as the main source rocks in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1417-1436.
- [20] 朱光有, 胡剑凤, 陈永权, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩地球化学特征与形成环境[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2116-2130.
- ZHU Guangyou, HU Jianfeng, CHEN Yongquan, et al. Geochemical characteristics and formation environment of source rock of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in Well Luntan 1 in Tarim basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 2116-2130.
- [21] 闫磊, 朱光有, 王珊, 等. 塔里木盆地震旦系—寒武系千米超深层天然气成藏条件与有利区带优选[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1446-1457.
- YAN Lei, ZHU Guangyou, WANG Shan, et al. Accumulation conditions and favorable areas for natural gas accumulation in the 10000 meters ultra-deep Sinian-Cambrian in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1446-1457.
- [22] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 770-787.
- YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: a case study of Shunbei oil and gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 770-787.
- [23] 杨海军, 蔡振忠, 李勇, 等. 塔里木盆地富满地区吐木休克组烃源岩有机地球化学特征及其油气勘探意义[J/OL]. 地质科技通报. (2023-05-30). <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzqk.tb20220705>.
- YANG Haijun, CAI Zhenzhong, LI Yong, et al. Organic geochemical characters of source rock and significance for exploration of the Tumuxiuke Formation in Fuman area, Tarim Basin[J/OL]. Bulletin of Geological Science and Technology. (2023-05-30). <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzqk.tb20220705>.
- [24] 冯建伟, 郭宏辉, 汪如军, 等. 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2506-2519.
- FENG Jianwei, GUO Honghui, WANG Rujun, et al. Segmentation genesis mechanism of strike-slip fracture of deep carbonate rocks in Tabei area, Tarim Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2506-2519.
- [25] 李兵, 邓尚, 李王鹏, 等. 塔里木盆地塔河地区走滑断裂体系活动特征与油气地质意义[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 45-51.
- LI Bing, DENG Shang, LI Wangpeng, et al. Strike-slip fault system activity and hydrocarbon geology understanding in Tahe of Tarim Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 45-51.
- [26] 赵永强, 云露, 王斌, 等. 塔里木盆地塔河油田中西部奥陶系油气成藏主控因素与动态成藏过程[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 758-766.
- ZHAO Yongqiang, YUN Lu, WANG Bin, et al. Main constrains and dynamic process of Ordovician hydrocarbon accumulation, central and western Tahe oil field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 758-766.
- [27] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1296-1310.
- HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(11): 1296-1310.
- [28] 胡文革. 塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征研究与实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 528-541.
- HU Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon

- charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 528-541.
- [29] 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, 6(42): 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.
- [30] 刘恩涛, ZHAO Jianxin, 潘松圻, 等. 盆地流体年代学研究新技术——方解石激光原位 U-Pb 定年法[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 698-712.
LIU Entao, ZHAO Jianxin, PAN Songqi, et al. A new technology of basin fluid geochronology: in-situ U-Pb dating of calcite[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 698-712.
- [31] PING Hongwei, CHEN Honghan, GEORGE S C, et al. Relationship between the fluorescence color of oil inclusions and thermal maturity in the Dongying depression, Bohai Bay Basin, China: part 1. Fluorescence evolution of oil in the context of hydrous pyrolysis experiments with increasing maturity[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 100: 1-19.
- [32] PING Hongwei, CHEN Honghan, ZHAI Puqiang, et al. Petroleum charge history in the Baiyun depression and Panyu lower uplift in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea: constraints from integration of organic geochemical and fluid inclusion data[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(6): 1401-1442.
- [33] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LU Huanzhang, FAN Hongrui, NI Pei, et al. Fluid inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [34] 刘雨晨, 邱楠生, 常健, 等. 碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用——以塔里木盆地顺托果勒地区为例[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2): 597-611.
LIU Yuchen, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Application of clumped isotope thermometry to thermal evolution of sedimentary basins: a case study of Shuntuoguole area in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2): 597-611.
- [35] 郑见超, 李斌, 吴海燕, 等. 基于盆地模拟技术的烃源岩热演化史及油气关系研究——以塔里木盆地玉尔吐斯组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(5): 39-49.
ZHENG Jianchao, LI Bin, WU Haiyan, et al. Study on the thermal history of the source rock and its relationship with hydrocarbon accumulation based on the basin modeling technology: a case of the Yuertusi Formation of Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(5): 39-49.
- [36] 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.
- [37] 杨毅, 王斌, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起北部中下奥陶统储层方解石脉成因及形成时间[J]. *地球科学*, 2021, 46(6): 2246-2257.
YANG Yi, WANG Bin, CAO Zicheng, et al. Genesis and formation time of calcite veins of Middle-Lower Ordovician reservoirs in northern Shuntuoguole low-uplift, Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(6): 2246-2257.
- [38] 李慧莉, 高键, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起走滑断裂带流体时空分布及油气成藏意义[J]. *地学前缘*, 2023, 30(6): 316-328.
LI Huili, GAO Jian, CAO Zicheng, et al. Spatial-temporal distribution of fluid activities and its significance for hydrocarbon accumulation in the strike-slip fault zones, Shuntuoguole low-uplift, Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 316-328.
- [39] 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.
- [40] QIU Nansheng, CHANG Jian, ZHU Chuanqing, et al. Thermal regime of sedimentary basins in the Tarim, Upper Yangtze and North China cratons, China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 224: 103884.
- [41] 朱光有, 李婧菲, 张志遥. 深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度评价: 以塔里木盆地海相油气为例[J/OL]. *地球科学*, (2021-11-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.
ZHU Guangyou, LI Jingfei, ZHANG Zhiyao. Origin of deep oil and gas phase state diversity and evaluation of secondary geochemical intensity: a case study of marine oil and gas in Tarim Basin[J/OL]. *Earth Science*. (2021-11-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.
- [42] 赵兴齐, 陈践发, 石杰, 等. 塔里木盆地轮南低凸起奥陶系深层天然气地球化学特征及成藏模式. [J]. *天然气工业*, 2023, 43(9): 49-60.
ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, SHI Jie, et al. Geochemical characteristics and accumulation model of Ordovician deep gas in Lunan low uplift of the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(9): 49-60.
- [43] 李斌, 姜满俊, 赵星星, 等. 塔里木盆地台盆过渡带多相态油气藏成因及差异富集模式——以玉科地区奥陶系为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(5): 794-808.
LI Bin, JIANG Xiaojun, ZHAO Xingxing, et al. Genesis and differential enrichment model of multiphase reservoirs in platform-basin transitional zone of Tarim Basin: a case study of the Ordovician in Yuke area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(5): 794-808.
- [44] 赵星星, 李斌, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中Ⅲ区奥陶系多相态油气藏成因及富集模式[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(1): 36-48.
Zhao Xingxing, LI Bin, WU Guanghui, et al. Genesis and enrichment model of Ordovician multi-phase oil and gas reservoirs in Tazhong III block, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(1): 36-48.