

鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组 10 段 油气成藏过程分析

吴悠^{1,2}, 陈一博¹, 胥中义³, 席明利⁴, 罗顺社¹

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 432100; 2. 非常规油气地质与工程湖北省工程研究中心, 湖北武汉 432100; 3. 中国石油长庆油田分公司第九采油厂, 宁夏银川 750001; 4. 中国石油长庆油田分公司油田开发事业部, 陕西西安 710016)

摘要:鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组油气资源丰富, 深层延长组 10 段(长 10 段)油气勘探取得突破, 但油气成藏过程复杂。根据流体包裹体岩相学特征、显微荧光观察、显微荧光光谱分析、显微测温分析及油包裹体最小捕获压力恢复结果等, 结合单井埋藏史—热演化史、生排烃过程和油气运移特征, 明确志靖—安塞地区长 10 段油气充注期次及成藏时间, 恢复不同期次油气充注时的古温压条件, 分析研究区油气成藏过程。结果表明: 志靖—安塞地区长 10 段发育三期油气充注, 分别为 151.8~139.0、129.5~123.8 和 120.0~100.1 Ma, 成藏时间主要处于白垩世中期。晚侏罗世—早白垩世早期, 志靖—安塞地区长 9 段烃源岩开始生排烃, 地层发育弱超压, 油气自上而下运移至长 10 段, 形成第一期油充注; 早白垩世中期, 长 7、长 9 段烃源岩进入生排烃高峰, 地层发育超压—强超压, 在异常高压的驱动下, 油气通过叠置砂体和裂缝持续自上而下向长 10 段充注; 在研究区东、西部异常压力差和构造高差的控制下, 油气自西向东于构造高位及有利砂体区聚集成藏。该结果对志靖—安塞地区延长组拓展深层油气勘探领域具有指导意义。

关键词:流体包裹体; 油气充注; 成藏过程; 长 10 段; 延长组; 志靖—安塞地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1; P618.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)01-0033-12

0 引言

鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区是长庆油田原油稳产、建产的主产区, 油气勘探主要集中于三叠系延长组浅层长 6 段及以上含油层系^[1-4]。近年来, 随油气勘探的不断深入, 志靖—安塞地区深层延长组 10 段(长 10 段)取得系列重大突破, 长庆油田在安塞地区高 52 井长 10 段获自喷工业油流, 发现桥 97、高 82 等含油有利区, 推动延长组深层油气成藏的研究^[4-8]。油气充注历史、运移动力和路径, 以及成藏过程分析是含油气盆地研究的重点内容之一, 对明确油气分布规律、指导油气勘探具有重要意义^[9-11]。在矿物结晶生长过程中, 流体包裹体是捕获于矿物晶格缺陷或窝穴的成岩成矿流体, 保存古流体被捕获时的温度、压力和成分等重要信息^[12-13]。含油气盆地储层成岩矿物中捕获的油气包裹体及其伴生的盐水包裹体, 是油气成藏过程中最直接、最可靠的记录, 可用于划分油气成藏期次和确定油气成藏时间、古温压条件、油气运移方向和油气组分等^[10, 13-16]。

人们对志靖—安塞地区长 10 段沉积及砂体展布特征、储层微观特征、油源对比等方面开展研究^[5-6, 17-20], 长 10 段沉积时期是鄂尔多斯盆地湖盆发育的早期阶段, 沉降速率大于沉积速率, 冲积河流发育, 三角洲沉积以平原河流相为主, 分流河道砂体广泛分布, 厚度大。长 10 段储层岩性以长石砂岩为主, 岩屑质长石砂岩次之, 储集空间类型主要为粒间孔、长石溶孔和浊沸石溶孔, 且志靖—安塞地区东部储集性能比西部的好^[21-23]。鄂尔多斯盆地中生界烃源岩主要分布于三叠系延长组长 4 和 5—长 9 油层组, 为半深湖—深湖相沉积, 其中长 7 段为主力烃源岩, 长 9 段为区带性烃源岩^[5]。志靖—安塞地区长 10 段油源对比分析表明, 长 7 和长 9 段两套烃源岩有贡献, 形成多期生排烃、多期油气充注的复杂成藏过程^[6, 17]。研究志靖—安塞地区长 10 段的多期油气充注特征及油气运移机制, 是分析复杂油气成藏过程的关键。

根据研究区 18 口井深层长 10 段储层流体包裹体分析结果, 结合单井埋藏史、热演化史、生排烃过程

收稿日期: 2024-06-17; 编辑: 朱秀杰

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672099); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB239003)

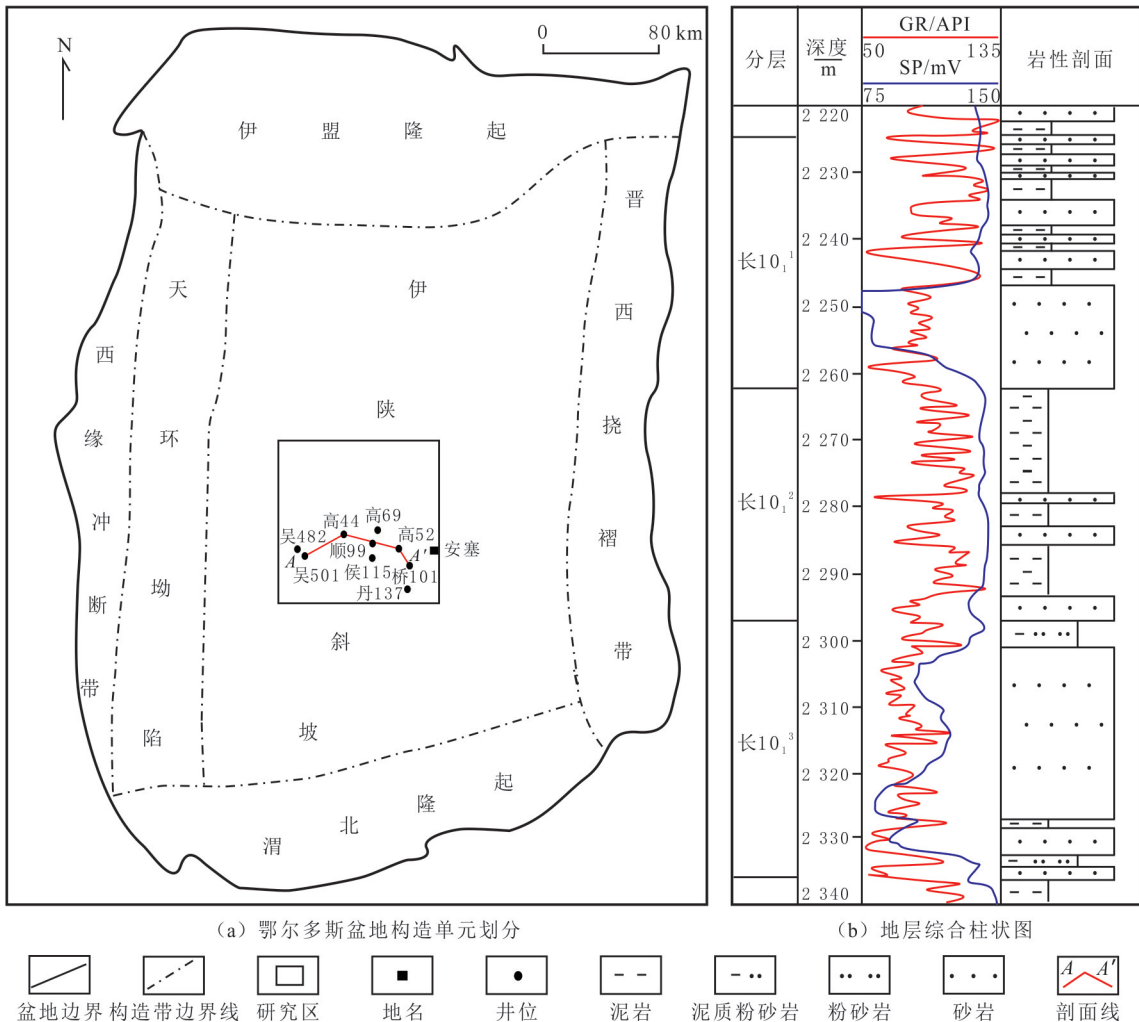
作者简介: 吴悠(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要从事油气成藏过程方面的研究。

和油气运移动力特征,分析志靖—安塞地区长10段油气充注微观特征,明确油气成藏过程,为研究区油气勘探提供依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国北方重要的含油气盆地之一,其中三叠系延长组是盆地致密油勘探开发的重要目的层位,盆地形态呈不规则的矩形,包括伊陕斜坡、晋西挠褶带、天环坳陷、西缘冲断带、伊盟隆起和渭北隆起6个一级构造单元^[1-2,7-8](见图1(a))。志靖—安塞地区位于伊陕斜坡中西部,北起陕西省靖边县,南至宁夏回族自治区永宁县,西起陕西省吴起县,东达陕西省延安市安塞区。长10段顶面为一宽缓的西倾单斜构造形态,局部发育低幅度鼻状隆起,地层倾角小于1°,地层厚度为350~380 m^[18,22]。

长10段自上而下依次划分为长10₁、长10₂和长10₃段,其中长10₁段厚度约为110 m,发现的含油显示位于长10₁段上部,岩石类型以岩屑质长石砂岩为主,长石砂岩次之。根据沉积旋回及小层划分等厚原则,长10₁段发育3期沉积旋回,自上而下划分为长10₁¹、长10₁²和长10₁³小层,每个小层厚度约为30 m(见图1(b))。各小层分界面的自然电位(SP)和自然伽马(GR)曲线为一个明显的台阶,界面上部砂岩与界面下部的泥岩呈突变接触^[22]。



(a) 鄂尔多斯盆地构造单元划分

(b) 地层综合柱状图

盆地边界 构造带边界线 研究区 地名 井位 泥岩 泥质粉砂岩 粉砂岩 砂岩 剖面线

图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及高44井长10段岩心综合柱状图

Fig. 1 Tectonic division and the lithological column of Chang 10 Member of well Gao 44 in Ordos Basin

2 样品与实验方法

样品取自鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区 18 口井岩心,采集深层长 10 段长石砂岩和石英砂岩的岩心样品 35 块,将岩心样品磨制成双面抛光流体包裹体薄片。实验在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成,主要包括单偏光观察、油包裹体荧光观察、阴极发光观察、流体包裹体显微测温、测盐和油包裹体最小捕获压力恢复。

单偏光及油包裹体荧光观察实验所用仪器为 Nikon Eclipse 80I 双通道荧光显微镜,配 100 倍 8 mm 长焦工作镜头和 Maya 2000 Pro 显微荧光光谱分析仪,紫外激发光激发波长为 330~380 nm,进行油包裹体岩相学观察与显微荧光光谱分析。阴极发光仪为 RELIOTRON III,工作电流为 300~500 μA ,工作电压为 5~8 kV,进行油包裹体宿主矿物成岩期次分析。显微测温测盐实验所用仪器为 Linkam 公司生产的 THMS 600G 冷热台,进行油包裹体及同期盐水包裹体均一温度测量,测温前用流体包裹体标样进行温度校正,升温速率为 0.1~5.0 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,当实验温度小于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,分析精度为 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$;当实验温度介于 30~200 $^{\circ}\text{C}$ 时,分析精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。油包裹体最小捕获压力通过 PVT 热动力学模拟法进行恢复,采用美国 CALSEP 开发的 VTFLINC 模拟软件。

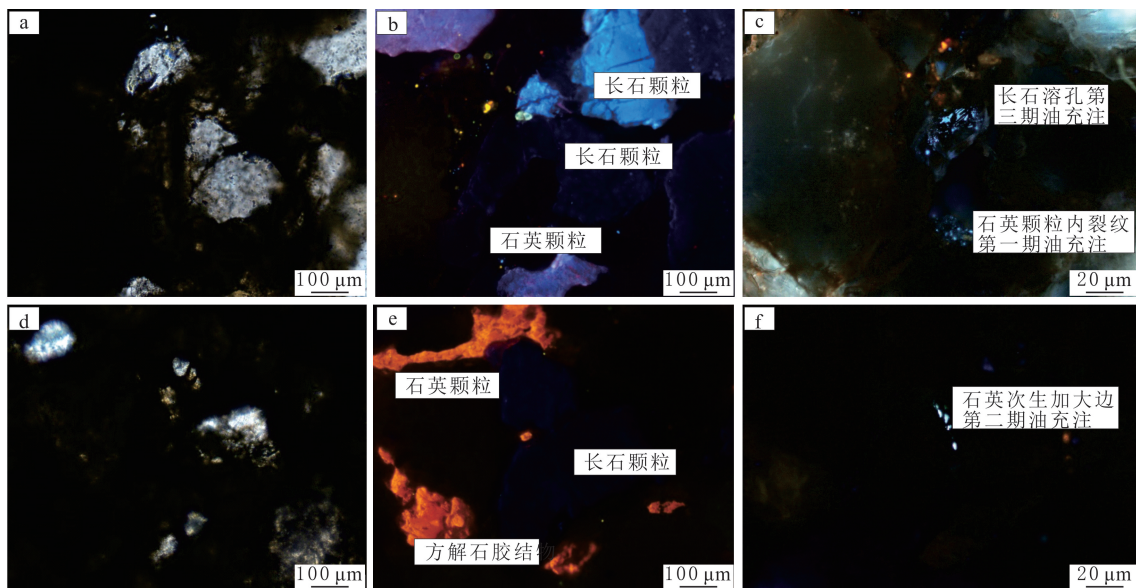
3 流体包裹体特征

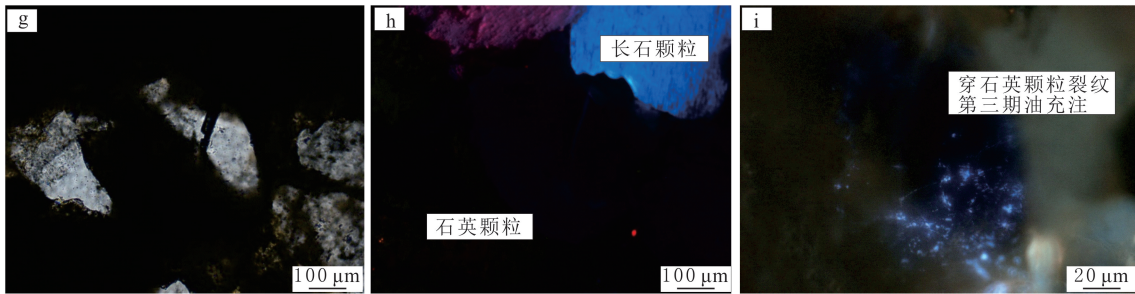
流体包裹体岩相学观察是油气成藏期次划分和成因分析的基础,主要包括显微镜下观察流体包裹体宿主矿物的类型、产状、矿物成岩序次及流体包裹体类型等^[10-11,15],可划分代表同一期的流体包裹体组合。在岩相学观察的基础上进行显微荧光观察,区分油包裹体和盐水包裹体,根据油包裹体荧光颜色和荧光光谱特征,对油气的充注期次进行初步划分^[11,22-25]。

3.1 岩相学特征

采用双通道荧光显微镜和冷阴极发光仪,对深层长 10 段流体包裹体样品进行油包裹体宿主矿物成岩作用观察,厘定成岩序次。储层中原生油包裹体数量较少,呈孤立或零星分布在石英次生加大边中;次生油包裹体数量较多,主要分布于石英颗粒内裂纹、长石溶蚀孔及穿石英颗粒裂纹(见图 2)。流体包裹体主要类型包括纯液相油包裹体、气液两相油包裹体、纯气相包裹体及盐水包裹体,以长条状、椭圆状和不规则状为主,大小为 3~12 μm 。

第一期油包裹体捕获于石英颗粒内裂纹,石英颗粒呈暗色阴极光,油气充注早于硅质胶结形成的石英次生加大边,以及由钙质胶结形成的发橘黄色阴极光的方解石(见图 2(a-c));第二期油包裹体捕获于石英次生加大边,油气充注早于溶蚀作用前,受胶结作用影响,油气充注规模较小(见图 2(d-f));第三期油包裹体捕获





(a-c) 高52井, 1 651.50 m, 长石砂岩, 石英颗粒内裂纹及长石溶蚀孔的油包裹体, 石英颗粒呈暗色阴极光, 长石颗粒呈蓝色阴极光; (d-f) 吴482井, 2 073.36 m, 石英砂岩, 石英次生加大边的油包裹体, 石英颗粒呈暗色阴极光, 方解石胶结物呈橘黄色阴极光; (g-i) 高52井, 1 651.50 m, 长石砂岩, 穿石英颗粒裂纹的油包裹体, 石英颗粒呈暗色阴极光, 长石颗粒呈蓝色阴极光; 图(a)、(d)和(g)为透射光照片, 图(b)、(e)和(h)为同视域阴极光照片, 图(c)、(f)和(i)为同视域荧光照片

图 2 志靖—安塞地区长 10 段岩相学观察照片

Fig. 2 Petrographic photographs of the Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

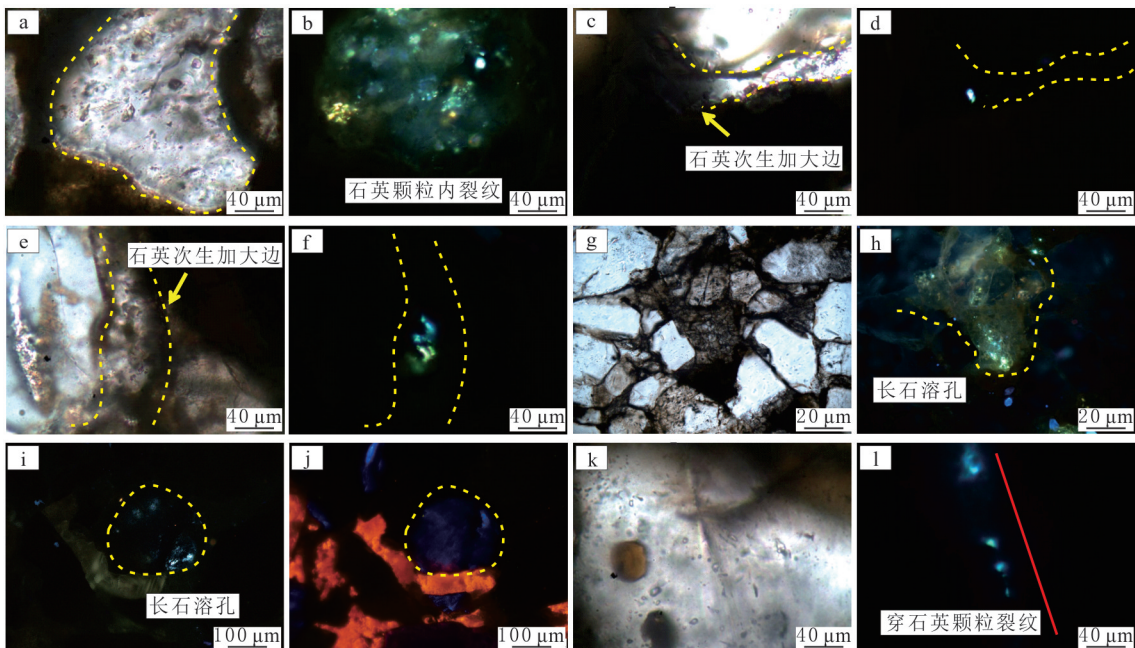
于长石溶蚀孔及穿石英颗粒裂纹, 长石颗粒呈蓝色阴极光, 伴随溶蚀作用, 油气充注最为活跃(见图 2(g-i))。

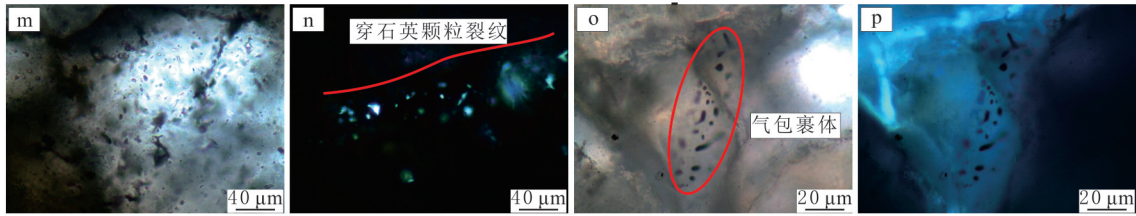
3.2 显微荧光特征及光谱分析

单个油包裹体的荧光特征参数包括油包裹体的荧光颜色、主峰波长(λ_{max})和 QF_{535} 等, 荧光由黄绿色→绿色→蓝绿色→亮蓝色发生颜色改变, 油包裹体荧光光谱主峰 λ_{max} 和 QF_{535} 逐渐减小, 反映充注原油成熟度逐渐增高^[11-13, 23]。深层长 10 段储层油包裹体显微荧光特征和荧光光谱分析结果显示, 存在 4 种不同荧光颜色的油包裹体, 分别为黄绿色、绿色、蓝绿色和亮蓝色(见图 3)。

石英颗粒内裂纹中检测到发黄绿色及蓝绿色的荧光油包裹体(见图 3(a-b)), 指示第一期为中—高成熟油充注; 石英次生加大边中检测到发黄绿色及蓝绿色荧光油包裹体(见图 3(c-f)), 油包裹体丰度小, 指示第二期油充注较弱, 主要为中—高成熟油充注; 长石溶蚀孔中检测到发绿色及蓝绿色荧光油包裹体(见图 3(g-j)); 穿石英颗粒裂纹中检测到发蓝绿色及亮蓝色荧光油包裹体(见图 3(k-n)), 以及纯气相包裹体(见图 3(o-p)), 指示第三期为高一过成熟油充注及天然气充注, 且油充注较活跃。

深层长 10 段单个油包裹体显微荧光光谱分析结果表明, 黄绿色荧光油包裹体 λ_{max} 为 528~538 nm, QF_{535} 为 1.21~2.03; 绿色荧光油包裹体 λ_{max} 约为 516 nm, QF_{535} 为 0.91~1.03; 蓝绿色荧光油包裹体 λ_{max} 为 490~497 nm, QF_{535} 为 0.61~0.98; 亮蓝色荧光油包裹体 λ_{max} 约为 465 nm, QF_{535} 为 0.77~0.84(见图 4)。油包裹体不同荧光颜色表明, 随油气充注的持续发生, 充注的原油成熟度逐渐增高。





(a-b) 高52井, 1 651.50 m, 中砂岩, 石英颗粒内裂纹中见黄绿色及蓝绿色荧光油包裹体; (c-d) 丹137井, 1 645.50 m, 细砂岩, 石英次生加大边中见蓝绿色荧光油包裹体; (e-f) 侯209井, 2 244.10 m, 细砂岩, 石英次生加大边中见黄绿色及蓝绿色荧光油包裹体; (g-h) 侯209井, 2 244.10 m, 细砂岩, 长石中见绿色荧光油包裹体; (i-j) 侯209井, 2 244.10 m, 细砂岩, 长石中见蓝绿色荧光油包裹体; (k-l) 丹137井, 1 645.50 m, 细砂岩, 穿石英颗粒裂纹中见蓝绿色及亮蓝色荧光油包裹体; (m-n) 高52井, 1 657.00 m, 中砂岩, 穿石英颗粒裂纹中见亮蓝色荧光油包裹体; (o-p) 午104井, 2 379.80 m, 中砂岩, 穿石英颗粒裂纹中见不发荧光的纯气相包裹体; 图 (a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k)、(m)、(o) 为透射光照片, 图 (b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l)、(n) 和 (p) 为同视域荧光照片

图 3 志靖—安塞地区长 10 段典型流体包裹体显微荧光照片

Fig. 3 The typical photomicrographs of fluid inclusion of Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

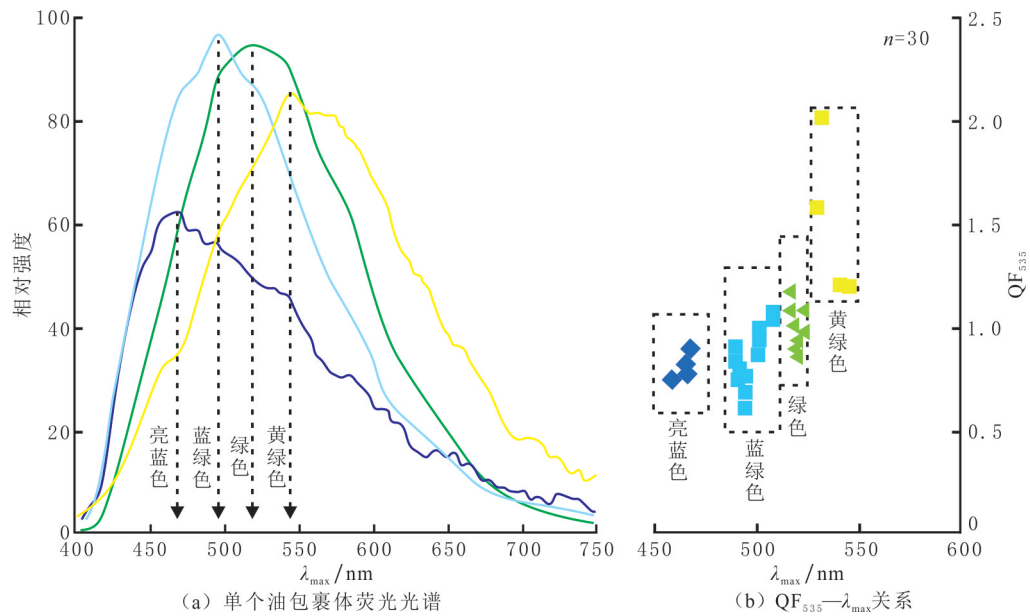


图 4 志靖—安塞地区深层长 10 段单个油包裹体显微荧光光谱及 $QF_{535} - \lambda_{max}$ 关系

Fig. 4 Fluorescent spectrums and relationship between QF_{535} and λ_{max} of individual oil inclusions of Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

4 油气充注期次及成藏时间

对分布在不同成岩序次中的油包裹体及同期盐水包裹体进行显微测温分析^[26-28]。以成岩序次为基础, 确定捕获不同期次油包裹体的序次; 将与油包裹体同期的盐水包裹体均一温度投影到单井埋藏史—热演化史, 对应时间轴上的年龄为油气充注年龄, 确定油气成藏期次及时间^[14-16, 27]。

4.1 流体包裹体显微测温

对研究区深层长 10 段储层 35 块样品不同产状的油包裹体, 以及同期盐水包裹体的显微测温数据进行统计, 结果见表 1 和图 5。石英颗粒内裂纹的黄绿色和蓝绿色荧光油包裹体的均一温度分布范围较宽, 分别为 79.8~111.2、102.3~163.1 °C; 与黄绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 87.1~100.9 °C, 指示第一期中成熟油充注时地层温度较低; 与蓝绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 99.8~104.3、118.3~134.1、141.3~148.7 °C, 指示第一期成熟—高成熟油充注时地层温度逐渐升高。

石英次生加大边的黄绿色和蓝绿色荧光油包裹体的均一温度分布范围较为集中, 分别为 89.2~98.7、106.2~113.4 °C; 与黄绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度为 104.3 °C; 与蓝绿色油包裹体共

生的盐水包裹体均一温度分布范围为 107.9~117.7 °C,指示第二期中一高成熟油充注时地层温度变化不明显。

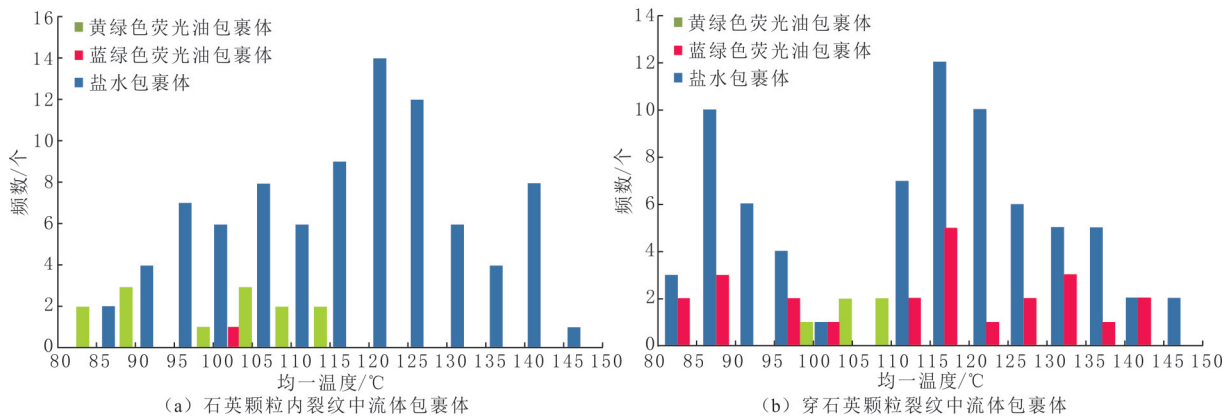
长石溶蚀孔的绿色和蓝绿色荧光油包裹体均一温度分布范围为 73.6~98.4、103.4~114.3、157.1~160.1 °C;与绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 95.2~104.3 °C,指示第三期成熟油充注时地层温度较低;与蓝绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 143.2~149.2 °C,指示第三期高成熟油充注时地层温度较高。

穿石英颗粒裂纹的蓝绿色和亮蓝色荧光油包裹体均一温度分布范围为 83.4~138.6、130.9~143.4 °C;与蓝绿色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 84.6~99.3、112.1~126.7、133.5~143.1 °C,指示第三期高成熟油充注时地层温度较高;与亮蓝色油包裹体共生的盐水包裹体均一温度分布范围为 121.8~127.2、140.1~147.8 °C,指示第三期过成熟油充注时地层温度较高。

表 1 志靖—安塞地区长 10 段油包裹体及同期盐水包裹体均一温度测试数据

Table 1 The homogenization temperatures of oil inclusion and their coeval aqueous inclusions of Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

井号	深度/m	产状	油包裹体 荧光	λ_{max}/nm	QF ₅₃₅	同期盐水包裹体均一温度/°C		
吴 482	2 073.36	穿石英颗粒裂纹	蓝绿色	492~502	0.77~0.84	84.6~93.7	112.1~117.3	
			亮蓝色	466	0.84		121.8~127.2	
高 69	1 834.90	石英颗粒内裂纹	蓝绿色	495~496	0.61~0.77	99.8~104.3		
高 52	1 651.50	石英颗粒内裂纹	黄绿色	528~538	1.27~2.01	87.1~91.7		
			蓝绿色	491~499	0.87~0.92	120.4~134.1		
			蓝绿色	491~497	0.61~0.92	85.9~93.2	115.3~124.2	
			亮蓝色	465	0.83	140.1~147.8		
侯 115	1 784.00	石英次生加大边	蓝绿色	495~497	0.87~0.92	107.9~117.7		
		穿石英颗粒裂纹	蓝绿色	497~499	0.95~0.96	91.7~99.3	120.1~124.3 133.5~143.1	
		石英颗粒内裂纹	黄绿色	538~547	1.21~2.03	100.9		
侯 209	2 244.10	石英次生加大边	蓝绿色	495~510	0.66~0.98	118.3~129.4		
			黄绿色	544	1.21	104.3		
			长石溶蚀孔	绿色	517~518	0.88~1.03	95.2~104.3	
			长石溶蚀孔	蓝绿色	495~501	0.84~0.93	143.2~149.2	
丹 137	1 645.50	石英颗粒内裂纹	蓝绿色	492	0.84	141.3~148.7		
		穿石英颗粒裂纹	蓝绿色	492~503	0.77~0.84	119.1~126.7		



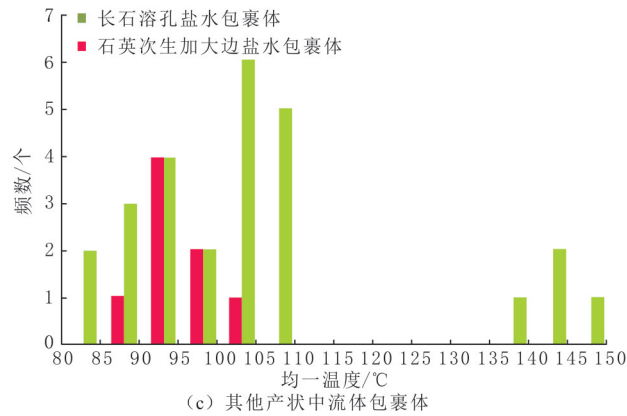


图 5 志靖—安塞地区长 10 段油包裹体及同期盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig. 5 The histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions of Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

4.2 成藏期次及时间

由研究区深层长 10 段储层包裹体成岩序次、包裹体组合类型和均一温度测试结果可知,研究区发育三期油气充注。中白垩世前,长 10 段发生三次短暂抬升;中白垩世后,开始持续抬升至新近纪末期。将三期与油伴生的同期盐水包裹体的最小均一温度视为油气最早充注时的捕获温度,利用 Schlumberger 公司开发的沉积盆地演化模拟软件(Petro-Mod(2016)),对高 52 井进行单井埋藏史和热演化史模拟(见图 6),获得油气开始充注的时间。

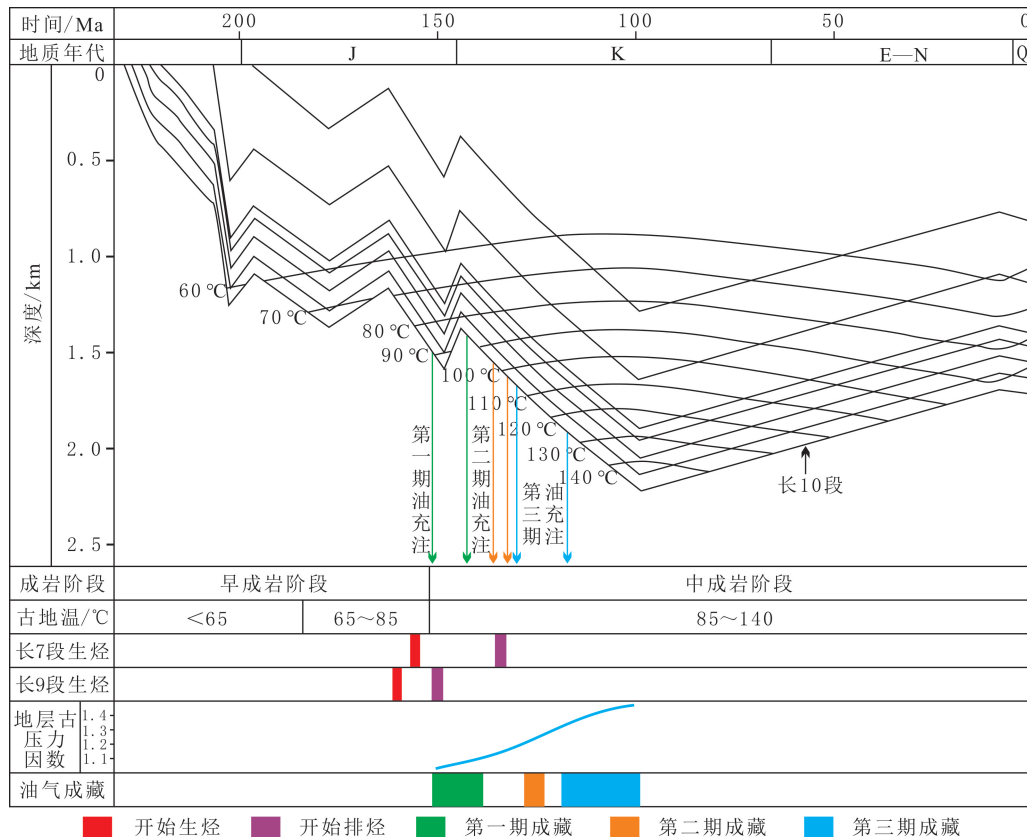


图 6 志靖—安塞地区高 52 井长 10 段油气充注时间

Fig. 6 The period of the oil and gas charging of Chang 10 Member of well Gao 52 in Zhijing to Ansai Area

第一期以发黄绿色荧光的成熟油充注为主,主要赋存于石英颗粒内裂纹,同期盐水包裹体均一温度分布于 87.1~100.9 °C,充注年龄为 151.8~139.0 Ma;第二期以发黄绿色、蓝绿色荧光的成熟—高成熟油

充注为主,主要赋存于石英次生加大边,同期盐水包裹体均一温度分布于 107.9~117.7 °C,充注年龄为 129.5~123.8 Ma,发生短暂油气充注成藏;第三期以发绿色、蓝绿色、亮蓝色荧光的高成熟—过成熟油和 不发荧光的天然气充注为主,主要赋存于长石溶蚀孔及穿石英颗粒裂纹,同期盐水包裹体均一温度为 121.8~127.2、140.1~149.2 °C,充注年龄为 120.0~100.1 Ma,油气持续充注成藏,是主要的油气成藏 时期。

研究区深层长 10 段油气成藏表现为晚侏罗世—早白垩世早期(151.8~139.0 Ma)较弱的成熟油充 注、白垩纪中期(129.5~100.1 Ma)持续的高成熟—过成熟油气充注。

5 油气成藏过程

在多期油气成藏过程中,不同油气充注时期的流体古压力恢复是研究油气动态成藏过程的重要 内容^[9-10,29]。结合研究区油气充注过程、烃源岩热演化史及油气藏古压力等,分析油气成藏过程及成藏 模式。

5.1 古压力恢复

采用流体包裹体 PVT 热动力学模拟法,恢复油包裹体捕获时的压力条件,是研究油气藏古压力的重 要方法之一^[9,30]。在获取油包裹体气泡填充度、油包裹体及同期盐水包裹体均一温度、油包裹体组分等参 数的基础上,采用 PVTsim 软件模拟,确定不同期次油包裹体捕获压力^[28-30]。

选择气液两相的单个油包裹体(直径大于 2 μm),且具有同期盐水包裹体,对用于油包裹体气泡填充 度测定的 12 组油包裹体和同期盐水包裹体的“数据对”进行最小捕获压力恢复。利用 Leica 激光/荧光共 聚焦扫描显微镜,测定不同期次油包裹体在室温下的气泡充填度,根据油包裹体均一温度及其室温下的气 泡充填度之间的函数关系,推算单个油包裹体组分^[31]。

研究区深层长 10 段油包裹体在室温下的气泡充填度主要分布在 10%~20%之间。黄绿色油包裹体 C₁ 组分质量分数为 5.07%~32.59%,C₇₊ 组分质量分数为 33.16%~71.36%;绿色—蓝绿色油包裹体 C₁ 组分质量分数为 15.10%~28.82%,C₇₊ 组分质量分数为 44.99%~63.34%;亮蓝色油包裹体 C₁ 组分 质量分数为 13.56%~20.38%,C₇₊ 组分质量分数为 57.91%~62.87%。根据油包裹体均一温度 t_o 及同 期盐水包裹体均一温度 t_q、油包裹体组分质量分数(C₁、C₇₊)和气泡充填度 F_v 等参数,采用 PVTsim 软件 模拟油包裹体的最小捕获压力 p_t,计算压力因数(F_p)(见表 2)。

表 2 志靖—安塞地区长 10 段油包裹体最小捕获压力相关参数

Table 2 Parameters of minimum trapping pressure of oil inclusion in the Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area

井号	深度/m	宿主矿物	油包裹体 荧光	t _o /°C	t _q /°C	F _v /%	w(C ₁)/ %	w(C ₇₊)/ %	p _t /MPa	F _p	油气充 注期次	
吴 482	2 073.36	穿石英颗粒裂纹	蓝绿色	102.9	119.7	13	16.42	54.39	21.32	1.43	第三期	
			亮蓝色	132.2	140.1	10	20.38	57.91	20.87	1.40		
高 69	1 834.90	石英颗粒内裂纹	蓝绿色	132.5	148.2	18	19.11	53.87	21.60	1.03	第一期	
			黄绿色	89.1	93.5	16	8.44	64.95	17.15	1.14	第一期	
高 52	1 651.50	穿石英颗粒裂纹	蓝绿色	104.0	117.8	17	15.10	57.61	23.69	1.38	第三期	
			亮蓝色	117.8	119.1	20	13.56	62.87	20.37	1.18		
侯 115	1 784.00	石英次生加大边	蓝绿色	122.2	132.5	19	20.35	51.69	22.09	1.19	第二期	
			穿石英颗粒裂纹	黄绿色	130.9	142.2	16	5.07	71.36	22.69	1.22	第三期
			石英次生加大边	蓝绿色	96.2	97.7	18	28.82	44.99	19.43	1.39	第二期
侯 209	2 244.10	长石溶蚀孔	黄绿色	83.4	89.5	10	32.59	33.16	16.56	1.32	第三期	
			绿色	103.4	115.4	13	17.54	50.40	19.49	1.39		
丹 137	1 645.50	石英颗粒内裂纹	蓝绿色	140.7	144.7	20	18.10	63.34	22.75	1.08	第一期	

由表 2 可知,第一期油气充注时流体包裹体捕获压力为 17.15~22.75 MPa,压力因数为 1.03~

1.14, 处于正常—弱超压环境;第二期油气充注时流体包裹体捕获压力为 19.43~22.09 MPa, 压力因数为 1.19~1.39, 处于超压环境;第三期油气充注时流体包裹体捕获压力为 16.56~23.69 MPa, 压力因数为 1.18~1.43, 处于超压—强超压环境。随油气的持续充注, 地层压力因数逐渐增大, 压力系统逐渐转变为超压环境, 为油气运移提供充足的动力条件。

5.2 生烃演化及充注过程

研究区深层长 10 段油藏主要集中于长 7、长 9 段烃源岩岩层较厚的区域, 尤其集中于生油凹陷区^[5]。结合研究区油气充注史、烃源岩热演化史和油源对比分析等, 研究区深层长 10 油层组的原油主要来自于长 9 段烃源岩, 东部地区可能有长 7 段烃源岩的一定贡献^[5,17,32-33]。

侏罗纪末期, 长 7 和长 9 段两套烃源岩达到生油门限; 早白垩世, 受构造运动影响, 长 7 段烃源岩的地层短暂抬升, 生排烃作用停止, 长 9 段烃源岩埋藏较深, 生排烃作用持续发生^[34-37], 研究区发生第一期 (151.8~139.0 Ma) 较弱的成熟油充注。早白垩世中期, 地层埋深达到最大, 进入生排烃高峰期, 流体包裹体系统分析表明, 早白垩世中—晚期是研究区深层长 10 段油气充注成藏的主要时期, 发生第二期 (129.5~123.8 Ma) 和第三期 (120.0~100.1 Ma) 高成熟—过成熟油气充注。长 9 段烃源岩紧邻长 10 段, 生成的油气较容易运移到下伏的长 10 段, 由于长 7 段烃源岩与长 10 段的纵向距离达到 200 m, 油气向下运移需要异常高的运移动力^[38-40], 根据油包裹体最小捕获压力恢复, 在烃源岩持续生烃过程中, 异常超压逐渐形成, 为上部烃源岩生成的油气向下运移提供充足的动力。

5.3 成藏模式

研究区东、西部油气充注成藏存在一定的差异性。西部地区仅在吴 482 井检测到穿石英颗粒裂纹中高成熟的蓝绿色荧光油包裹体, 与油包裹体伴生的盐水包裹体均一温度在 84.6~93.7、112.1~117.3 °C 之间, 埋藏史投影法确定的成藏时间在 152.0~149.0 Ma 之间, 处于晚侏罗世, 颗粒间可见沥青充填, 说明晚期油藏遭受一定的破坏及调整作用。东部地区油气充注更为活跃, 发生三期油充注及一期天然气充注, 时间分别为 151.8~139.0、129.5~123.8、120.0~100.1 Ma, 成藏时间主要处于早白垩世—中白垩世, 最早成藏时间晚于西部地区的, 但持续时间长, 对油气富集更有利。

研究区西部地区长 7 段烃源岩较厚, 向东减薄; 东部地区长 9 段烃源岩较厚, 向西减薄 (见图 7)。长 7 段烃源岩向长 10 段供烃较难, 长 9 段烃源岩供烃不足, 导致西部地区油气充注较弱。西部地区第三期油包裹体最小捕获压力为 20.87~21.32 MPa, 压力因数为 1.40~1.43, 东部地区第三期油包裹体最小捕获

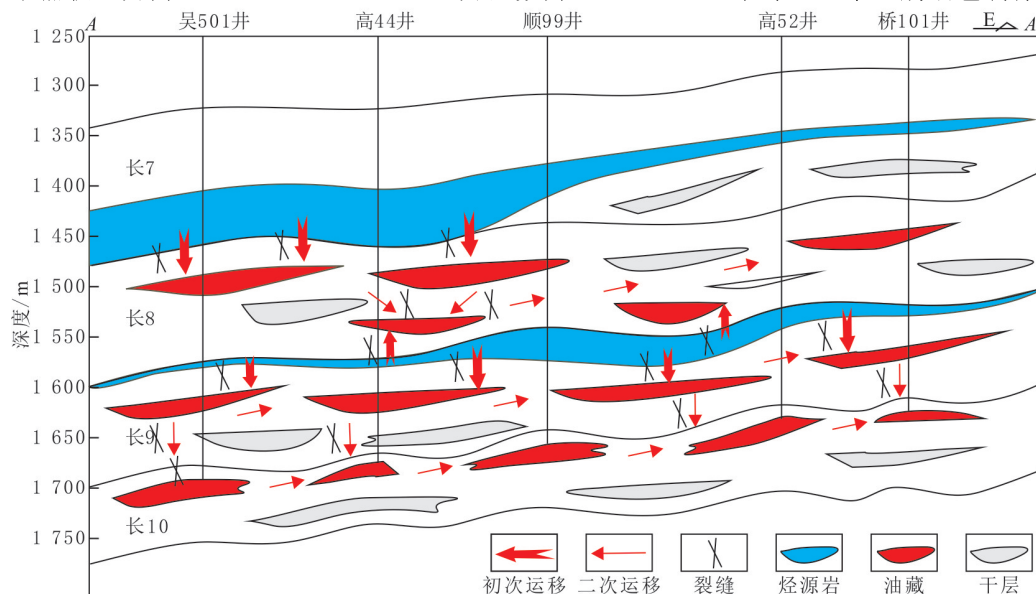


图 7 志靖—安塞地区长 10 段油气成藏模式 (剖面位置见图 1)

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation pattern of Chang 10 Member in Zhijing to Ansai Area (section position as shown in fig. 1)

压力为 20.37~23.69 MPa,压力因数为 1.18~1.38;受控于延长组低幅度的鼻状隆起构造影响,油气在异常压力差和构造高部位的控制下自西而东运移,形成深层长 10 段油藏有利富集区。

6 结论

(1)鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组深层长 10 段油气包裹体主要发育于石英颗粒内裂纹、石英次生加大边、长石溶蚀孔及穿石英颗粒裂纹 4 种成岩产状,存在黄绿色、绿色、蓝绿色和亮蓝色 4 种不同荧光颜色的油包裹体。

(2)研究区深层长 10 段发育三期油气充注,第一期油包裹体发育于石英颗粒内裂纹,发黄绿色及蓝绿色荧光,代表晚侏罗世末期—早白垩世早期(151.8~139.0 Ma)成熟—高成熟油充注;第二期油包裹体发育于石英次生加大边,发绿色及蓝绿色荧光,代表早白垩世(129.5~123.8 Ma)高成熟油充注,但油气充注较弱;第三期油包裹体发育于穿石英颗粒裂纹及长石溶蚀孔,发蓝绿色及亮蓝色荧光,代表中白垩世(120.0~100.1 Ma)高成熟—过成熟的油气充注,是油气充注的主要时期。

(3)早白垩世早期,长 9 段烃源岩进入生烃门限,地层压力因数为 1.03~1.14,处于常压—弱超压系统,油气自上而下发生第一期较弱的成熟油充注;早白垩世中期—晚期,长 7 及长 9 段烃源岩进入生排烃高峰期,地层压力逐渐发育为超压,压力因数为 1.18~1.43,在异常高压的驱动下,发生第二期和第三期较活跃的高成熟—过成熟油气充注。

(4)研究区深层长 10 段东、西部油气充注成藏存在一定的差异性。西部地区油气充注较弱,东部地区油气充注更为活跃。在异常高压的驱动下,长 7、长 9 段烃源岩生成的油气通过叠置砂体和裂缝沟通,油气自上而下、自西向东运移至长 10 油层组聚集成藏。

参考文献(References):

- [1] 刘显阳,李士祥,周新平,等.鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报,2023,44(12):2070-2090.
LIU Xianyang, LI Shixiang, ZHOU Xinping, et al. New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(12):2070-2090.
- [2] 屈红军,杨县超,曹金丹,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深层油气聚集规律[J].石油学报,2011,32(2):243-248.
QU Hongjun, YANG Xianchao, CAO Jinzhou, et al. Oil accumulation rules in deep zones of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(2):243-248.
- [3] 杨华,张文正,蔺宏斌,等.鄂尔多斯盆地陕北地区长 10 油源及成藏条件分析[J].地球化学,2010,39(3):274-279.
YANG Hua, ZHANG Wenzheng, LIN Hongbin, et al. Origin of Chang 10 Oil Reservoir in Northern Shaanxi Region of Ordos Basin[J]. Geochimica, 2010,39(3):274-279.
- [4] 王道伸,辛红刚,惠克来,等.致密砂岩储层孔喉结构特征及其对含油性的控制作用:以鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组 8 段为例[J].天然气地球科学,2024,35(4):623-634.
WANG Daoshen, XIN Honggang, XI Kelai, et al. Characteristics of pore throat structure and its control on oiliness in tight sandstone reservoirs: case study of the 8th member of Yanchang Formation in Zhijing-Ansai Area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024,35(4):623-634.
- [5] 李士祥,刘显阳,韩天佑,等.陕北地区延长组长 10 油层组成藏特征[J].石油与天然气地质,2011,32(5):698-709.
LI Shixiang, LIU Xianyang, HAN Tianyou, et al. Characteristics of hydrocarbon pooling in Chang-10 interval of the Yanchang Fm in the Northern Shaanxi Province[J]. Oil & Gas Geology, 2011,32(5):698-709.
- [6] 高鹏鹏.延长油田延长组深层油气成藏主控因素及有利区预测[D].西安:西北大学,2013:12-33.
GAO Pengpeng. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in the deep zones and prediction of favorable areas in Yanchang Oilfield[D]. Xi'an: Northwest University, 2013:12-33.
- [7] 肖正录,李勇,喻健,等.致密油“近源成藏”关键地球化学证据:以鄂尔多斯盆地延长组近源组合为例[J].石油实验地质,2023,45(3):517-527.
XIAO Zhenglu, LI Yong, YU Jian, et al. Key geochemical evidence of “near-source accumulation” of tight oil: a case study of near-source assemblage of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023,45(3):517-527.
- [8] 席胜利,刘新社,任军峰,等.鄂尔多斯盆地风险勘探领域油气成藏认识新进展与勘探潜力[J].中国石油勘探,2023,28(3):34-48.

- XI Shengli, LIU Xinshe, REN Junfeng, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023,28(3):34-48.
- [9] 赵融康,黄诚,黄继文.塔里木盆地顺南地区奥陶系高压气藏成藏过程分析[J].*东北石油大学学报*,2023,47(6):13-24.
ZHAO Rongkang, HUANG Cheng, HUANG Jiwen. Analysis of accumulation process of gas reservoir with high pressure in Ordovician in south of Shuntuoguole Uplift, Tarim Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023,47(6):13-24.
- [10] 罗富文,柳少波,卓勤功,等.库车坳陷秋里塔格构造带中东段油气充注期次及成藏模式[J].*东北石油大学学报*,2024,48(1):26-38.
LUO Fuwen, LIU Shaobo, ZHUO Qingong, et al. Hydrocarbon charging stage and accumulation model in the middle-east section of Qiulitag Structural Belt, Kuqa Depression[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(1):26-38.
- [11] 陈红汉,吴悠,丰勇,等.塔里木油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J].*石油与天然气地质*,2014,35(6):806-819.
CHEN Honghan, WU You, FENG Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014,35(6):806-819.
- [12] GOLDSTEIN R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems[J]. *Lithos*, 2001,55(1/2/3/4):159-193.
- [13] 倪培,范宏瑞,潘君屹,等.流体包裹体研究进展与展望(2011—2020)[J].*矿物岩石地球化学通报*,2021,40(4):802-818.
NI Pei, FAN Hongrui, PAN Junyi, et al. Progress and prospect of fluid inclusion research in the past decade in China(2011-2020) [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021,40(4):802-818.
- [14] GEORGE S C, VOLK H, AHMED M. Geochemical analysis techniques and geological applications of oil-bearing fluid inclusions, with some Australian case studies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007,57(1/2):119-138.
- [15] 尚培,陈红汉,鲁子野,等.塔里木盆地玉北地区奥陶系成岩流体演化与油气成藏时期的耦合关系[J].*地球科学*,2020,45(2):569-582.
SHANG Pei, CHEN Honghan, LU Ziyue, et al. The coupling relationship between diagenetic fluid inclusion and hydrocarbon accumulation in the Ordovician of Yubei Area, Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2020,45(2):569-582.
- [16] 成科璋,崔军平,孟张勇,等.鄂尔多斯盆地吴起地区延安组储层流体包裹体特征与油气成藏期次分析[J].*中国地质*,2023,50(3):692-703.
CHENG Kezhang, CUI Junping, MENG Zhangyong, et al. Characteristics of fluid inclusions and analysis of hydrocarbon accumulation stages of Yan'an Formation in Wuqi Area, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2023,50(3):692-703.
- [17] 李相博,刘显阳,周世新,等.鄂尔多斯盆地延长组下组合油气来源及成藏模式[J].*石油勘探与开发*,2012,39(2):172-180.
LI Xiangbo, LIU Xianyang, ZHOU Shixin, et al. Hydrocarbon origin and reservoir forming model of the Lower Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012,39(2):172-180.
- [18] 李克永,李文厚,张东阳,等.鄂尔多斯盆地安塞油田长 10 优质储层特征[J].*地质通报*,2013,32(9):1454-1460.
LI Keyong, LI Wenhui, ZHANG Dongyang, et al. An analysis of favorable reservoir characteristics of Chang 10 Formation in the Ansai Oilfield, Ordos Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013,32(9):1454-1460.
- [19] 李元昊,郭小军,梁艳,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 10 油层组沉积特征及物源[J].*古地理学报*,2018,20(5):787-802.
LI Yuanhao, GUO Xiaojun, LIANG Yan, et al. Sedimentary characteristics and provenance of the Chang 10 interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018,20(5):787-802.
- [20] 姚泾利,李渭,王亚玲,等.陕北地区延长组长 101 储层成岩作用与成岩相[J].*地质通报*,2014,33(11):1842-1852.
YAO Jingli, LI Wei, WANG Yaling, et al. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 101 Reservoir in Northern Shaanxi Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014,33(11):1842-1852.
- [21] 孟婧,张莉莹,李芮,等.致密砂岩储层微孔隙结构特征及其分类评价[J].*特种油气藏*,2023,30(4):71-78.
MENG Jing, ZHANG Liying, LI Rui, et al. Microscopic pore structure characteristics of tight sandstone reservoir and its classification evaluation[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023,30(4):71-78.
- [22] 张严,代榕,罗顺社,等.鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组长 10 储层特征及主控因素分析[J].*中国科技论文*,2018,13(9):1029-1035.
ZHANG Yan, DAI Rong, LUO Shunshu, et al. Characteristics and its main controlling factors of Chang 10 Reservoir in Yanchang Formation in Zhijing-Ansai Area, Ordos Basin[J]. *China Sciencepaper*, 2018,13(9):1029-1035.
- [23] PING H W, CHEN H H, THIERY R, et al. Effects of oil cracking on fluorescence color, homogenization temperature and trapping pressure reconstruction of oil inclusions from deeply buried reservoirs in the Northern Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,80(1):538-562.
- [24] 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.
- [25] 吴悠,王海红,罗顺社,等.鄂尔多斯盆地镇原地区延长组长 8 段致密砂岩油藏差异油气充注历史[J].*地质科技情报*,2018,37(1):

- 153-159.
- WU You, WANG Haihong, LUO Shunshe, et al. Differential hydrocarbon charging history of Chang 8 tight sandstone reservoir of Yanchang Formation in Zhenyuan Area, Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2018,37(1):153-159.
- [26] 张新乐,平宏伟,杨鑫,等.鄂尔多斯盆地南缘泾河油田长7段烃源岩生、排烃期与油气成藏期对比[J]. *地质科技通报*,2024,43(1):108-121.
- ZHANG Xinle, PING Hongwei, YANG Xin, et al. Comparison of hydrocarbon generation, expulsion periods, and accumulation periods of source rocks in member 7 of the Yanchang Formation in the Jinghe Oilfield, Southern Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024,43(1):108-121.
- [27] 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]. *地学前缘*,2023,30(3):165-180.
- LIU Xiuyan, CHEN Honghan, XIAO Xuewei, et al. Characterization of the shale gas formation process based on fluid inclusion evidence: an example of the Lower Cambrian Niutitang Shale Formation, Xiushan Section, Southeastern Chongqing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023,30(3):165-180
- [28] 丁超,郭顺,郭兰,等.致密砂岩储层成岩过程及其与油气充注的关系:以鄂尔多斯盆地富县地区长8储层为例[J]. *非常规油气*,2024,11(4):29-38.
- DING Chao, GUO Shun, GUO Lan, et al. Relationship between tight sandstone reservoir diagenetic process and hydrocarbon charging: a case study of Chang 8 Reservoir in Fuxian Area, Ordos Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(4):29-38.
- [29] TSENG H Y, POTTORF R J. The application of fluid inclusion PVT analysis to studies of petroleum migration and reservoirs[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003,78/79:433-436.
- [30] 席斌斌,蒋宏,许锦,等.基于包裹体 PVTx 数值模拟恢复油藏古温压:存在的问题、对策及应用实例[J]. *石油实验地质*,2021,43(5):886-895.
- XI Binbin, JIANG Hong, XU Jin, et al. Reconstruction of paleo-temperature and pressure of oil reservoirs based on PVTx simulation: problems, strategies and case studies[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021,43(5):886-895.
- [31] 平宏伟,陈红汉.甲烷摩尔含量约束的石油包裹体捕获压力预测模型[J]. *地球科学*,2014,39(1):79-90.
- PING Hongwei, CHEN Honghan. Prediction model of petroleum inclusion trapping pressure constrained by methane mole content [J]. *Earth Science*, 2014,39(1):79-90.
- [32] 赵文智,卞从胜,李永新,等.鄂尔多斯盆地三叠系长73亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类型[J]. *石油勘探与开发*,2023,50(1):12-23.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, LI Yongxin, et al. Organic matter transformation ratio, hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment type in Chang 73 shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023,50(1):12-23.
- [33] 付金华,牛小兵,淡卫东,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. *中国石油勘探*,2019,24(5):601-614.
- FU Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):601-614.
- [34] 杨浩,阳波,石伟,等.鄂尔多斯盆地华庆地区长9油藏富集特征及潜力区预测[J]. *特种油气藏*,2023,30(2):78-85.
- YANG Hao, YANG Bo, SHI Wei, et al. Enrichment characteristics and potential area prediction of Chang 9 Reservoir in Huaqing Area of Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023,30(2):78-85.
- [35] 崔景伟,张忠义,刘建良,等.鄂尔多斯盆地延长组多烃源层生排烃定量及成藏贡献厘定[J]. *天然气地球科学*,2021,32(10):1514-1531.
- CUI Jingwei, ZHANG Zhongyi, LIU Jianliang, et al. Hydrocarbon generation and expulsion quantification and hydrocarbon accumulation contribution of multiple source beds in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021,32(10):1514-1531.
- [36] 李玉宏,孟祥振,罗然昊,等.陕北地区三叠系延长组长10段油藏原油特征及其来源[J]. *西安科技大学学报*,2013,33(1):33-38.
- LI Yuhong, MENG Xiangzhen, LUO Ranhao, et al. Reservoir crude oil features of the Chang 10 Layer in the north of Shaanxi Province[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2013,33(1):33-38.
- [37] 白玉彬,罗静兰,刘新菊,等.鄂尔多斯盆地吴堡地区上三叠统延长组原油地球化学特征及油源对比[J]. *沉积学报*,2013,31(2):374-383.
- BAI Yubin, LUO Jinglan, LIU Xinju, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Yanchang Formation(Upper Triassic) in Wubao Area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013,31(2):374-383. (下转第60页)