

引用格式:马骥,王金铎,张奎华,等.准噶尔盆地深层致密砂岩油藏富集机理与成藏模式——以莫西庄、永进地区为例[J].油气地质与采收率,2025,32(2):60-71.

MA Ji, WANG Jinduo, ZHANG Kuihua, et al. Enrichment mechanisms and accumulation models of deep tight sandstone reservoirs in Junggar Basin: A case study of Moxizhuang and Yongjin areas[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(2): 60-71.

# 准噶尔盆地深层致密砂岩油藏富集机理与成藏模式

——以莫西庄、永进地区为例

马骥<sup>1</sup>,王金铎<sup>1</sup>,张奎华<sup>1</sup>,张关龙<sup>1</sup>,曾治平<sup>1</sup>,胡海燕<sup>2</sup>,宫亚军<sup>1</sup>,张翊<sup>1</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015; 2.长江大学资源与环境学院,湖北武汉 430100)

**摘要:**准噶尔盆地中部莫西庄和永进地区侏罗系砂岩中发现工业油气流,一些地区侏罗系埋深达6 000 m,储层孔隙度和渗透率极低,属于特低孔和特低渗透储层。在如此致密的储层中,需要系统探讨和阐述原油充注动力、油气来源与运移过程。为揭示原油在致密砂岩储层中的富集过程与主控因素,采用生物标志化合物确定油气来源及原油的主力烃源岩;通过定量和半定量方法研究断层在水平和垂直方向的滑移距离以及断层的封闭性,应用统计与地质分析相结合阐述断层规模与试油产量的关系,明确断层规模、断距对油气成藏的意义;采用微米CT扫描、恒速压汞、核磁共振、物理模拟系统刻画和表征砂岩孔隙结构参数以及流体在这些致密储层的聚集模式。结果表明:原油主要来源于二叠系烃源岩;规模大和活动强度高的断层为油气垂向运移通道,地质时期水平和垂向移动距离超过700 m且规模达到20 km以上的断层有较好的油气输导能力,而小规模和移动距离较小的断层大多起封闭作用;致密储层孔隙半径较小,主要分布在163.8~207.7 μm,喉道半径为0.5~8.1 μm,微观孔隙结构的非均质性特征导致原油的差异性充注与富集,中孔-粗喉型储层含油程度最高,大孔-细喉和小孔-细喉型次之,小孔-微喉型含油程度最低。侏罗系致密砂岩成藏主要受活动强度高且规模较大的断裂以及致密砂岩孔隙结构影响与控制。

**关键词:**致密砂岩;断层;微米CT扫描;核磁共振;准噶尔盆地

文章编号:1009-9603(2025)02-0060-12

DOI:10.13673/j.pgre.202501002

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

## Enrichment mechanisms and accumulation models of deep tight sandstone reservoirs in Junggar Basin: A case study of Moxizhuang and Yongjin areas

MA Ji<sup>1</sup>, WANG Jinduo<sup>1</sup>, ZHANG Kuihua<sup>1</sup>, ZHANG Guanlong<sup>1</sup>, ZENG Zhiping<sup>1</sup>,  
HU Haiyan<sup>2</sup>, GONG Yajun<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China)

**Abstract:** Commercial oil and gas flow was discovered in the Jurassic sandstones of Moxizhuang and Yongjin areas in the central Junggar Basin. The reservoir porosity and permeability are very low in some areas where the buried depth of the Jurassic reaches 6 000 m, belonging to ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoirs. In such tight reservoirs, the charging power of crude oil, the source of oil and gas, and the migration process need to be systematically discussed. Biomarkers were used to de-

收稿日期:2025-01-06。

作者简介:马骥(1985—),男,河南南阳人,高级工程师,硕士,从事石油与天然气地质勘探工作。E-mail:maji.slyt@sinopec.com。

通信作者:胡海燕(1977—),男,河南浚池人,教授,博士。E-mail:hyhucom@163.com。

基金项目:中国石化项目群“准噶尔盆地腹部超深层P-T成藏规律及勘探关键技术”(P22127)。

termine the source of oil and the main source rocks of crude oil in tight sandstone reservoirs to reveal the enrichment process and main controlling factors of crude oil in tight sandstone reservoirs. The slip distances of the faults in horizontal and vertical directions and the sealing properties of the faults were studied by quantitative and semi-quantitative methods, and the relationship between fault size and oil test production was clarified by combining statistics and geological analysis. Moreover, the influence of fault size and fault distance on oil and gas accumulation was explored. Micro-CT scanning, constant-rate mercury injection, nuclear magnetic resonance (NMR), and physical simulation were applied to systematically describe and characterize the pore structure parameters of sandstones and fluid accumulation models in these tight reservoirs. The results show that the crude oil is mainly from the Permian source rocks. The faults with large sizes and high activity intensity are vertical migration channels of oil and gas, and the faults with horizontal and vertical movement distances of more than 700 m and a size of more than 20 km at geological time have better oil and gas transport capacity. However, the faults with small sizes and short movement distances are mostly closed. The pore sizes of the tight reservoirs are small, mainly in the range of 163.8-207.7  $\mu\text{m}$ , and the throats are 0.5-8.1  $\mu\text{m}$ . The heterogeneity of the micro-pore structures leads to the differential charging and enrichment of crude oil. The oil content of reservoirs with medium porosity and coarse throat is the highest, followed by the reservoirs with large porosity and small throat, and the oil content of reservoirs with small porosity and micro throat is the lowest. The accumulation of Jurassic tight sandstone reservoirs is mainly influenced and controlled by high activity intensity, large faults, and pore structures of tight sandstone.

**Key words:** tight sandstone; fault; micro-CT scanning; nuclear magnetic resonance (NMR); Junggar Basin

准噶尔盆地是复杂叠合型盆地,盆地发展演化经历复杂,二叠纪为裂陷盆地,三叠纪—古近纪发展为陆内拗陷盆地,新近纪演化为前陆盆地,油气资源丰富,在盆内正向构造带发现多个大型油气田;盆地中部侏罗系埋深大,储层致密,孔隙度和渗透率极低,喉道细小,油气充注难度大;来自二叠系、三叠系、侏罗系烃源岩的油气均有发现<sup>[1-15]</sup>。准噶尔盆地中部断层较为发育,油气运移主要依靠穿层断层<sup>[9-15]</sup>。目前存在的主要问题是断层特征刻画较为清晰,然而,断层在深部地层油气成藏过程的意义缺乏系统的阐述,致密储层中充注动力及其对原油的制约机制尚不明确。因此,笔者以断层、储层的定性和定量评价入手,采用多种手段厘定断层和储层的多重维度,剖析断层对油气成藏的意义和影响以及储层对油气成藏的控制,建立油气成藏模式,预测有利目标,为准噶尔盆地深层油气勘探和开发提供思路和依据。

## 1 区域地质概况

准噶尔盆地位于欧亚板块中心位置,盆地四周为褶皱山系,东北主要为克拉美丽山、青格里底山和阿尔泰山,西北主要为哈拉阿拉特山、扎伊尔山,南边为天山,盆地与这些周缘山系边界处主要发育逆冲断裂带。盆地现今形态呈现为三角形,南北较窄,东西略长。古亚洲洋与特提斯构造域多旋回挤压、伸展构造作用不同程度影响了准噶尔盆地形成,导致盆地构造发育非常复杂<sup>[1-10]</sup>。深部地球物

理探测和重磁电证据表明,准噶尔盆地基底是由盆地早期存在前寒武结晶基底和叠加了边缘褶皱山系为主体的海西期褶皱基底组成,具有双层结构,但不同边缘的基底组成具有差异性。这种基底的不均一性对盆地变形特征具有重要的控制作用<sup>[3-5]</sup>。

准噶尔盆地中部地区(准中地区)目前主要勘探层系为中生界三叠系、侏罗系以及白垩系。印支期至喜马拉雅期受到来自西北缘、东北缘、南缘3个盆缘断裂带的构造应力影响,加之盆地内部二级构造带局部的应力调节作用,不同地区应力特征及断层成因机制存在一定差别<sup>[12-19]</sup>。从石炭纪开始,准噶尔盆地在漫长地质过程中发生了多期构造运动,导致盆内多旋回沉降,多期地壳构造变动和古气候共同控制了盆地的沉积作用<sup>[1-5]</sup>。盆地沉积充填的地层主要为石炭系—第四系。

研究区块主要位于中国石化负责勘探开发的中部1区块和中部2区块(图1)。中部1区块主体位于准噶尔盆地腹部盆1井西凹陷,北邻达巴松凸起,西接中拐凸起,南邻昌吉凹陷;中部1、2区块主要位于昌吉凹陷,钻井主要分布在莫西庄、永进地区。中部区块由于处在凹陷的深部位,受构造运动影响比较弱,褶皱构造相对较少,主要形成了横跨盆地中部地区的大型、宽缓的车-莫古隆起,并在隆起构造的背景上发育一些局部低幅度背斜和鼻状构造<sup>[7, 9, 11]</sup>。盆地在中生界沉积过程中受八大水系的控制,发育一系列的(扇)三角洲沉积体系<sup>[7, 8, 10]</sup>,因此,中部1、2区块侏罗系中发育较多的岩性圈闭和地层圈闭。

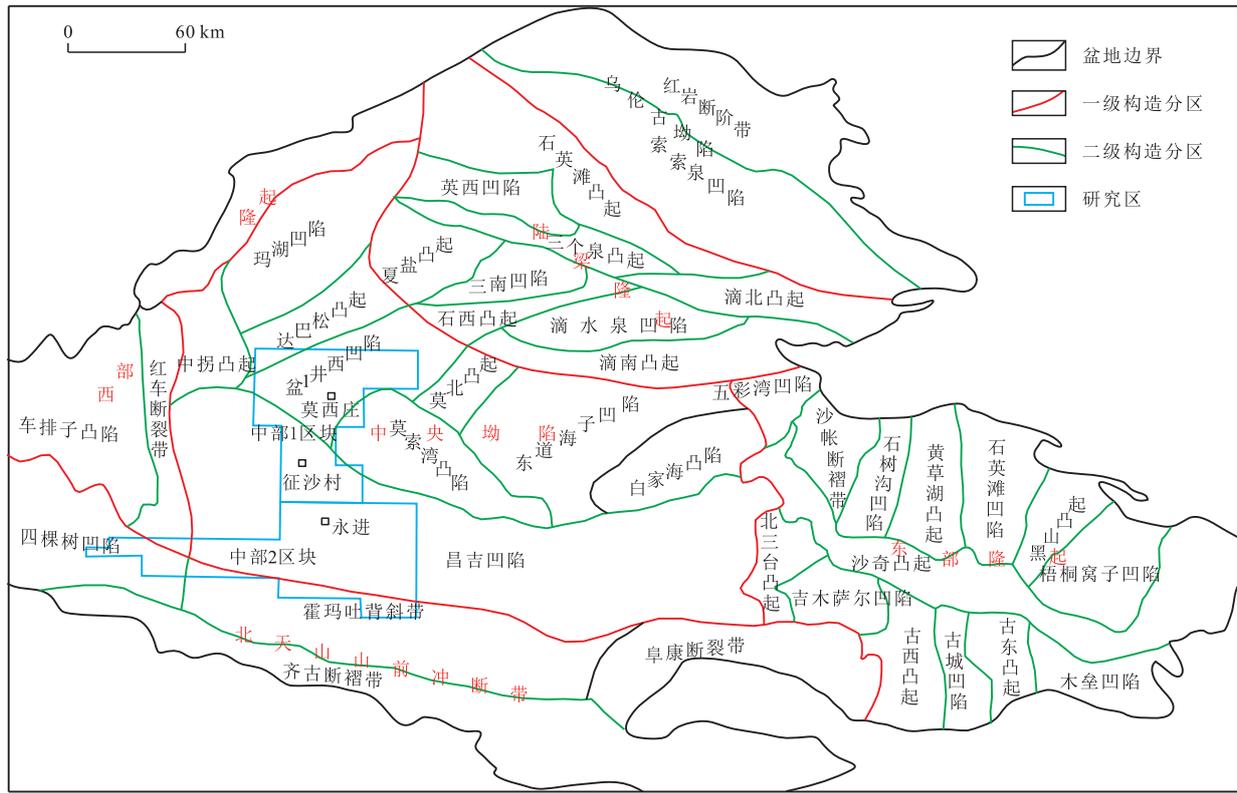


图1 研究区区域构造位置  
Fig.1 Location of study area

## 2 油气来源分析

准噶尔盆地具备多套生烃系统,主要包括石炭系、二叠系、侏罗系、古近系等,对于准中地区深层来说,可能供烃的烃源岩主要为二叠系湖相乌尔禾组 and 侏罗系湖沼相煤系烃源岩。

准中地区侏罗系是一套湖沼相含煤沉积建造,具有厚度较大、分布较为广泛、有机质含量高等特点,烃源岩主要为八道湾组和西山窑组(表1)。侏罗系泥岩与暗色泥岩的厚度分别占侏罗系厚度的50.64%和40.40%<sup>[6-8]</sup>;八道湾组和西山窑组的暗色泥岩分别占地层总厚度的42.32%和42.05%。除暗色泥岩外,侏罗系还分布有炭质泥岩和煤层,八道湾组和西山窑组的炭质泥岩厚度分别占地层厚度的3.47%和2.58%;其煤层厚度分别占暗色泥岩厚度的7.64%和15.20%。准中地区没有钻遇二叠系,只能参考周缘数据和资料推测二叠系烃源岩的发育特征。20世纪80年代,为查明准噶尔盆地东部地层发育特征,寻找钻探目标,在克拉美丽山山前带部署了12 km×15 km的地震测网,在地震解释剖面上发现在克拉美丽山山前带存在一个二叠系的生油凹陷。采集帐篷沟剖面二叠系平地泉组样品进

表1 准噶尔盆地地层分布

Table1 Formation distribution of Junggar Basin

系	统	中西部	东北部	
侏罗系	上统	齐古组 J <sub>3q</sub>	石树沟群 J <sub>2-3s</sub>	齐古组 J <sub>3q</sub>
	中统	头屯河组 J <sub>2t</sub>		头屯河组 J <sub>2t</sub>
		西山窑组 J <sub>2x</sub>	西山窑组 J <sub>2x</sub>	西山窑组 J <sub>2x</sub>
	下统	三工河组 J <sub>1s</sub>	三工河组 J <sub>1s</sub>	三工河组 J <sub>1s</sub>
		八道湾组 J <sub>1b</sub>	八道湾组 J <sub>1b</sub>	八道湾组 J <sub>1b</sub>
三叠系	上统	白碱滩组 T <sub>3b</sub>	小泉沟群 T <sub>2-3xq</sub>	黄山街组 T <sub>3h</sub>
	中统	上克拉玛依组 T <sub>2k2</sub>		克拉玛依组 T <sub>2k</sub>
		下克拉玛依组 T <sub>2k1</sub>		
二叠系	下统	百口泉组 T <sub>1b</sub>	上仓房沟群 T <sub>1ch</sub>	烧房沟组 T <sub>1s</sub> 韭菜园子组 T <sub>1j</sub>
	上统	上乌尔禾组 P <sub>3w</sub>	下仓房沟群 P <sub>3ch</sub>	梧桐沟组 P <sub>3wt</sub> 泉子街组 P <sub>3q</sub>
二叠系	中统	下乌尔禾组 P <sub>2w</sub>	平地泉组 P <sub>2p</sub>	
		夏子街组 P <sub>2x</sub>	将军庙组 P <sub>2j</sub>	
	下统	风城组 P <sub>1f</sub>	金沟组 P <sub>1jg</sub>	
	佳木河组 P <sub>1j</sub>			

行实验分析测试,结果显示,总有机碳含量(TOC)为0.72%~4.44%,平均为2.22%,镜质体反射率(R<sub>o</sub>)测试值为0.92%,热解生烃潜力(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>)为1.58~9.16 mg/g,平均为4.85 mg/g,总体来看,二叠系属于低成熟-成熟较好烃源岩<sup>[16-19]</sup>。

采集原油样品和抽提砂岩中的抽提物后,分析测试其中的生物标志化合物种类和含量,用以表征原油的生物标志化合物特征,追踪油气来源。莫西庄和永进地区侏罗系多口井试油获得油气流,其生物标志化合物特征如下:①三环萜烷 $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$ 呈山峰型分布,三环二萜烷含量很高,三环萜烷/藿烷为1.81~2.14。②伽马蜡烷、 $T_s$ 含量相对较高, $T_s/(T_s+T_m)$ 为0.35~0.50,伽马蜡烷指数较高(为0.43~0.64)。③ $C_{29}$ -降藿烷含量较高。④规则甾烷分布 $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ 甾烷 $<\alpha\alpha\alpha 20RC_{28}$ 甾烷 $<\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$ 甾烷。⑤升孕甾烷、孕甾烷含量较高。⑥反映湖相沉积环境的 $\beta$ -胡萝卜烷含量很高。⑦反映原油成熟度的指标 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 、 $C_{29}$ 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和 $C_{31}$ 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 平均值分别为0.50~0.53、0.46~0.51和0.52~0.63。⑧从气相色谱特征分析,GC谱图完整,反映生物降解现象不明显(图2)。

根据原油碳同位素值可进一步量化二叠系湖相烃源岩和侏罗系煤系烃源岩二者的相对贡献,计算结果表明,莫西庄和永进地区侏罗系致密砂岩储层中60%以上的原油来自二叠系湖相烃源岩的贡献。

### 3 断层对油气成藏的意义

二叠系原油运移至上覆侏罗系,势必通过断层,大多采用泥岩涂抹指数等评估其垂向封闭性<sup>[9-15]</sup>。断层规模和断距是断层的重要参数,在油气成藏中的意义鲜有研究,尤其是准噶尔盆地在地质历史时期经历多次演化,断层性质复杂,既有垂向运动也有水平移动,很难从一个维度评估其成藏意义;准噶尔盆地发育不同规模的断层,其走向延伸从数千米到数十千米不等,这些断层在油气成藏过程中的作用不尽相同,只用一个泥岩涂抹指数来评估其开启与封闭有失偏颇,需要多重维度来研究其成藏意义。

#### 3.1 断层规模

断层规模是指断层在走向上延伸的距离,一定程度上代表地质活动的强弱或者断层活动的强度。莫西庄地区油藏主要分布在三工河组二段底部10 m和顶部40 m范围内的砂体,前人认为是砂体尖灭和致密夹层形成的岩性油气藏<sup>[20-21]</sup>。本次采用高质量的地震数据体精细解释断层,发现在多个层间发育许多小断层,这些小断层将前人认为是一个整体的油气藏划分为多个断块油气藏。

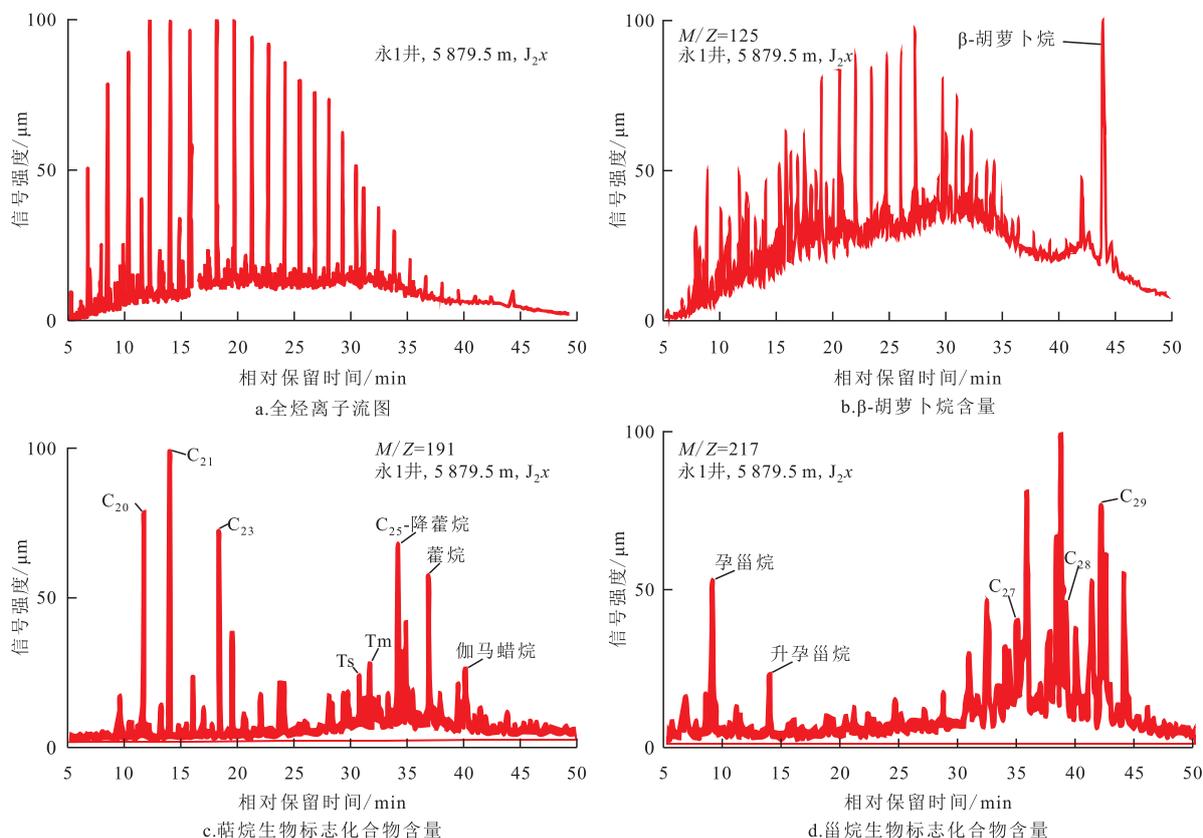


图2 永进地区侏罗系原油生物标志化合物特征  
Fig.2 Characteristics of crude oil biomarkers of the Jurassic in Yongjin area

永进地区侏罗系发育数条走滑断层及层间小断层。一些断层贯穿二叠系烃源岩和侏罗系三工河组和西山窑组;层间小断层断距不超过20 m,地震数据体上表现为波组微小的错动、反射波中止或反射波相位发生突变等,这些不易识别的小断层主要是起着封闭作用,发育断层-岩性圈闭。统计距离试油井2 km以内的断层规模(图3),数据显示断层规模与油气井试油产量有明显相关性:断层规模(断层沿走向延伸长度)大于20 km时,试油日产量高于10 m<sup>3</sup>/d,而且随着断层规模增大,试油日产量快速增大;断层规模小于20 km时,试油日产量明显下降。断层规模对油气成藏的影响机制可能是规模大的断层为油气运移优势通道概率更大,断层附近的圈闭更易于捕获油气而聚集成藏。

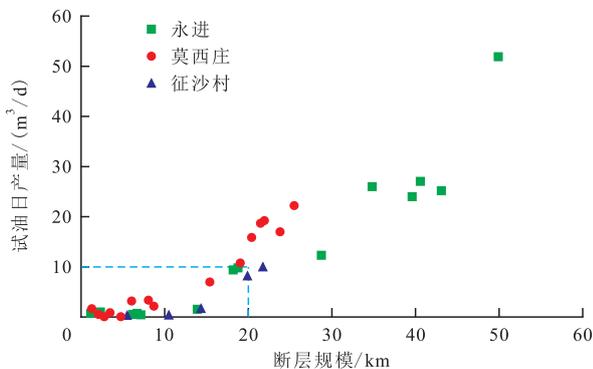


图3 断层规模与试油日产量相关关系  
Fig.3 Correlation between fault size and oil test production

### 3.2 断距

断层埋深、倾角、泥岩涂抹指数等对断层的封闭性具有一定的影响<sup>[22-25]</sup>,除了这些因素,还要考量断距对于油气成藏的意义。准噶尔盆地断层性质复杂,不同地质历史阶段性质常常发生转变和转化,准中地区的断层往往既有垂向运动也有水平走滑。为更好地表达断层断距在本地区的作用,认为采用断层垂直断距和走滑断层水平滑移量2项指数表征断层活动强度,可以较为合理地表征断层在地质历史时期的活动强度。断层活动强度表达式为:

$$H = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

式中: $H$ 为断层活动强度,m; $a$ 为断层垂直断距,m; $b$ 为走滑断层水平滑移量,m。

对研究区块多个断层应用式(1)进行定量表征,发现油层和油水同层附近的断层活动强度大多高于700 m(图4),说明断层在地质历史时期处于比较活跃时才主要起垂向输导作用。

综上所述,规模较大、垂向运动和水平走滑活跃的断层是二叠系烃源岩原油向浅层运移至侏罗

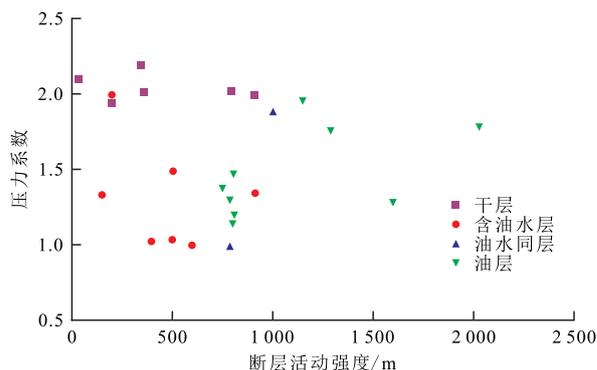


图4 断层活动强度与储层含油气性关系  
Fig.4 Relationship between fault activity intensity and reservoir hydrocarbon-bearing property

系圈闭中聚集成藏的重要垂向通道。

## 4 储层对油气成藏的控制

### 4.1 储层物性

储层对油气成藏的控制主要体现在致密储层中油气分布的非均一性上。前人研究显示,准噶尔盆地深层中存在相对较好的储层,其发育机理主要包括:超压发育对压实作用的顶抗作用减少了对储层的破坏;油气早期充注效应有效隔离地层水与矿物的水岩相互作用,抑制胶结作用<sup>[25-26]</sup>;颗粒包壳是绿泥石包裹岩石颗粒,有效抑制胶结物在颗粒周边沉淀,保护储层<sup>[27]</sup>;有机质热演化过程中会产生一定的有机酸,这些有机酸溶蚀岩石中的易溶组分如长石、方解石等产生溶蚀孔<sup>[28]</sup>。上述机制能够一定程度保护储层,在深层发育相对较优的储层。储层物性与含油级别具备良好的对应关系,孔隙度和渗透率越高对应的含油级别越高<sup>[29]</sup>。

莫西庄和永进地区侏罗系砂岩孔隙度为1.5%~20%,平均为12%,渗透率为0.01~1 000 mD,平均为8 mD(图5)。莫西庄地区侏罗系孔隙度和渗透

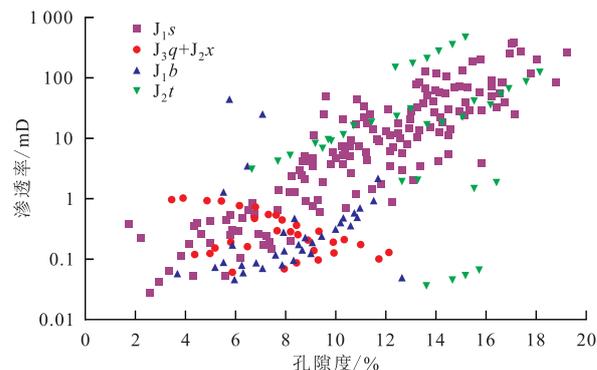


图5 莫西庄和永进地区侏罗系孔隙度与渗透率交会  
Fig.5 Cross plot of orosity and permeability of the Jurassic in Moxizhuang and Yongjin areas

率较高,具备良好的储集条件,而永进地区侏罗系孔隙度和渗透率较低,孔隙度大多低于12%,渗透率低于1 mD。莫西庄和永进地区储层物性与含油性关系(图6)显示,试油日产量高于10 m<sup>3</sup>/d的储层,其孔隙度和渗透率分别高于11%和7 mD;油层的孔隙度为8%~11%,渗透率为1~7 mD;干层的孔隙度低于8%,渗透率低于1 mD。

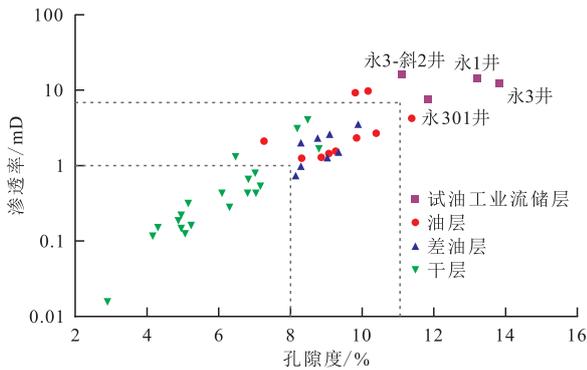


图6 莫西庄和永进地区储层物性与含油性关系

Fig.6 Relationship between reservoir physical properties and oil-bearing property in Moxizhuang and Yongjin areas

永进地区储层物性较差的主要原因为:①砂岩中含有较多的塑性岩屑,这些岩屑在砂岩埋藏过程中易于压实,堵塞孔隙。②砂岩粒径较小,以粉砂岩为主,在压实作用过程中易于重新排列,降低砂岩孔隙度。③发育一定厚度的煤层,这些煤层在热演化早期产生溶蚀能力强的有机酸,溶蚀岩石颗粒,降低岩石抗压性,这些因素导致砂岩在深埋过程对于压实作用敏感,易于压实,导致储层致密。经过统计,永进地区压实作用减孔量占总减孔量的78.4%,胶结作用减孔量占总减孔量的21.6%。

#### 4.2 孔隙结构

储层为油气提供聚集空间,不同的孔隙和喉道产生的毛细管力不同,油气需不断克服毛细管力从而在储层中聚集,因此,储层对油气成藏的控制主要体现在物性以及微观孔喉对油气分布的影响上<sup>[30-34]</sup>。研究区块砂岩储层致密,孔隙半径小、孔喉细,采用微米CT扫描、恒速压汞、核磁共振(NMR)等技术联合表征孔隙半径与其分布。

孔隙和喉道的大小、分布、形状与连通情况是表征致密储层的主要内容。常规技术方法难以表征致密储层的微观孔隙、喉道。微米CT扫描技术可定量表征微观孔喉结构,在不破坏岩心整体状态的情况下,通过对岩心进行数字化扫描,将所获取的图像进行科学的处理和分割,建立三维孔隙结构模型,分析毫米-微米-纳米级裂缝和孔隙特征与空间分布状态、计算孔隙度和孔径大小、识别孔隙类

型、分析喉道大小和连通性等信息,是无损测试样品孔径,同一样品可以重复测试,可以很好保护样品<sup>[35-36]</sup>。微米CT扫描获得的孔隙度为1.6%~12.1%,平均为6.5%,平均孔隙半径为19~37 μm,平均为27 μm;其中中孔孔隙度为0.7%~9.8%,平均为4.6%,占总孔隙度的70%;微孔孔隙度为0.4%~1.8%,平均为0.9%,占比为14.5%;大孔孔隙度为0%~3.3%,平均为0.9%,占比为13.8%(表2)。

表2 微米CT孔隙结构参数  
Table2 Pore structure parameters of micro-CT

样品编号	微米CT扫描孔隙度/%	平均孔隙半径/μm	微孔孔隙度/%	中孔孔隙度/%	大孔孔隙度/%
Z105-6	5.2	35	0.4	4.4	0.5
Z101-8	9.1	34	0.9	8.0	0.2
Z3-8	10.3	37	0.6	8.9	0.8
Z101-12	4.7	27	1.0	3.6	0.1
Z3-3	12.1	28	0.8	9.8	1.5
Z3-5	5.9	21	1.1	2.3	2.5
Z101-15	8.5	19	0.9	4.3	3.3
Z3-7	4.1	25	1.2	2.6	0
Z11-8	3.8	21	1.8	1.8	0.1
Z101-9	1.6	21	0.7	0.7	0
平均值	6.5	27	0.9	4.6	0.9

压汞技术是用以表征储层微观孔隙和喉道半径等的重要实验测试方法。常规的压汞技术是在固定压力下,将液态汞驱替进储层孔隙,应用进汞量与压力计算孔隙喉道半径,提供喉道半径对应的孔隙体积数据,不能提供测量喉道数量信息。恒速压汞技术是以非常低的恒定速度使汞进入岩石孔隙,这样的进汞过程可以近似地作为静态过程,接触角与界面张力保持基本不变,汞的前缘所经历的每一处孔隙都会引起系统毛细管力的改变。研究表明,恒速压汞的平均喉道半径与孔渗的相关关系较之于常规压汞要好很多,恒速压汞技术用以表征喉道的数量分布更为有效。本次研究采用恒速压汞技术,假设接触角和界面张力恒定,根据实验过程中压力变化速率识别孔隙和喉道,确定孔隙连通情况,根据压汞曲线求得孔隙半径、喉道半径及孔喉半径比等参数<sup>[37-38]</sup>。根据恒速压汞数据(图7,表3),孔隙半径为163.8~207.7 μm,平均为179.5 μm;喉道半径为0.5~8.1 μm,平均为3.7 μm;孔喉比为33~370,平均为112;孔体积为22.9~44.5 nL,平均为33.2 nL。

核磁共振技术是利用射频脉冲在磁场中照射原子核以探测物质分子性质的物理现象<sup>[37-39]</sup>,优点

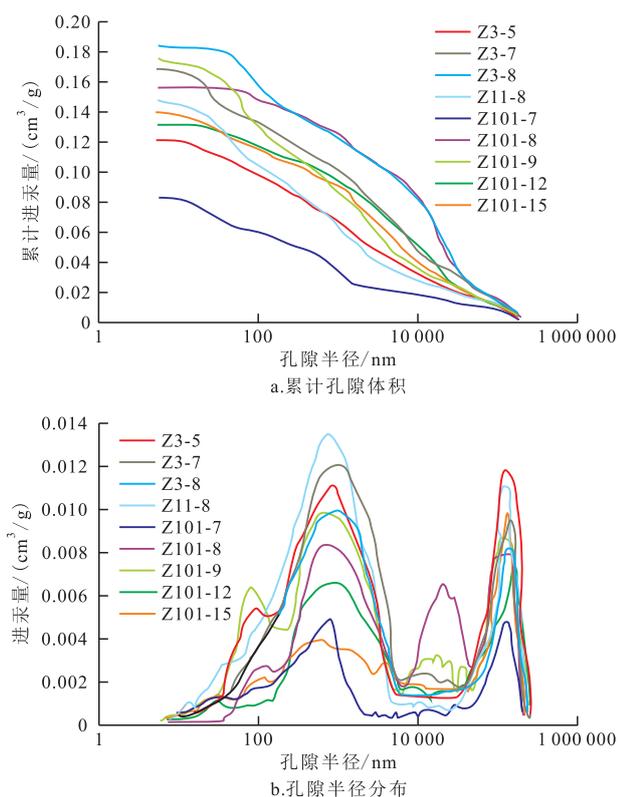


图7 恒速压汞技术表征储层中孔隙半径分布

Fig.7 Pore size distribution in reservoirs characterized by constant-rate mercury injection

表3 压汞实验测试的孔喉数据

Table3 Pore throat data of mercury injection experiments

样品编号	孔隙半径/ $\mu\text{m}$	喉道半径/ $\mu\text{m}$	孔喉比	孔体积/nL
Z105-9	193.8	7.2	38	44.5
Z101-8	207.7	7.8	33	44.3
Z3-8	201.0	8.1	34	42.6
Z101-12	168.3	4.0	62	24.2
Z3-5	170.2	2.6	86	27.4
Z101-15	164.4	2.0	92	22.9
Z3-7	170.8	1.9	116	30.5
Z11-8	163.8	1.3	156	23.3
Z101-9	173.1	1.8	128	33.0
Z101-7	182.2	0.5	370	39.3
平均值	179.5	3.7	112	33.2

是高效、近原位测试、无损,采用不同的前处理方式可以得到岩石样品的多种参数信息,如流体饱和度、孔隙度、渗透率等。当储层致密到一定程度后,流体在其中不能流动,成为束缚流体,核磁共振弛豫时间对应一个界限值,称为可动流体截止值。基于弛豫时间分析致密储层中的流体,进而精确评价致密储层孔隙结构。研究区块储层孔隙半径分为单峰型和双峰型2种分布形态。单峰型主要样品有

Z11-8、Z101-7、Z101-15,双峰型主要样品有 Z3-5、Z3-7、Z101-8 等,孔隙半径分布主要为 0.01 ~ 100  $\mu\text{m}$ (图8)。

### 4.3 原油渗流模拟

一般来讲,原油充注储层需要克服相对细小孔隙的毛细管阻力,才能在砂体中运移聚集。研究区块砂体孔隙和喉道狭小,毛细管阻力较大,导致原油在储层中充注的模式多样。不同物性区间的低渗透储层原油充注实验结果表明,原油在充注低渗透储层的时候通常存在上凹型非达西渗流与变性达西渗流2种形式<sup>[30-34]</sup>。

上凹型非达西渗流曲线主要分为非线性渗流段和拟线性渗流段2部分,非线性渗流段曲线表现为非线性关系,且该曲线段多凹向压力梯度轴,随着渗流速度增大,曲线的非线性段逐渐过渡为线性段。从图9a可以看出,原油在致密砂岩储层与低渗透砂岩储层的充注过程相似度较高,充注速度和饱和度均表现为先慢后快,呈现上凹型的渗流特征,不同于传统的达西流。二者在渗流特征之间具有不同的变化特征,其中致密砂岩储层渗流曲线的弯曲程度呈上升趋势,且与压力梯度轴更加贴近,线性段较短,启动压力梯度高且分布范围比较广泛,为0.04~6.00 MPa/cm。低渗透砂岩储层启动压力梯度为0.005~0.05 MPa/cm,渗流曲线弯曲程度呈下降趋势,线性段明显增加(图9b)。高渗透砂岩储层启动压力梯度极低,为0.001~0.005 MPa/cm,分布比较集中,样品之间差异小,原油在储层中呈线性流动形式,在机制上明显不同于致密与低渗透砂岩储层(图9c)。

原油在圈闭中的聚集过程表现为饱和度不断增加,采用不同物性的砂岩岩心样品做充注模拟实验旨在阐明原油在储层中的聚集原理与过程。依据原油在砂岩中充注实验结果,可以将原油在砂岩中的聚集过程分为缓慢增长型(I型)、快速增长型(II型)、快速增长-稳定型(III型)3种模式。

缓慢增长型(I型)原油需要一定的启动压力,只有充注动力达到启动压力梯度后,含油饱和度才开始缓慢增加,随着压力梯度逐渐增加则含油饱和度亦缓慢增长,含油饱和度从10%增至50%~60%后趋于稳定阶段,比较典型的是Z101-15样品的充注过程与聚集模式。快速增长型(II型)显示当充注动力超过启动压力梯度后,含油饱和度超过20%后开始快速增加直至趋于稳定阶段<sup>[21]</sup>,这种聚集模式比较典型的是Z101-14样品表现出来的充注曲

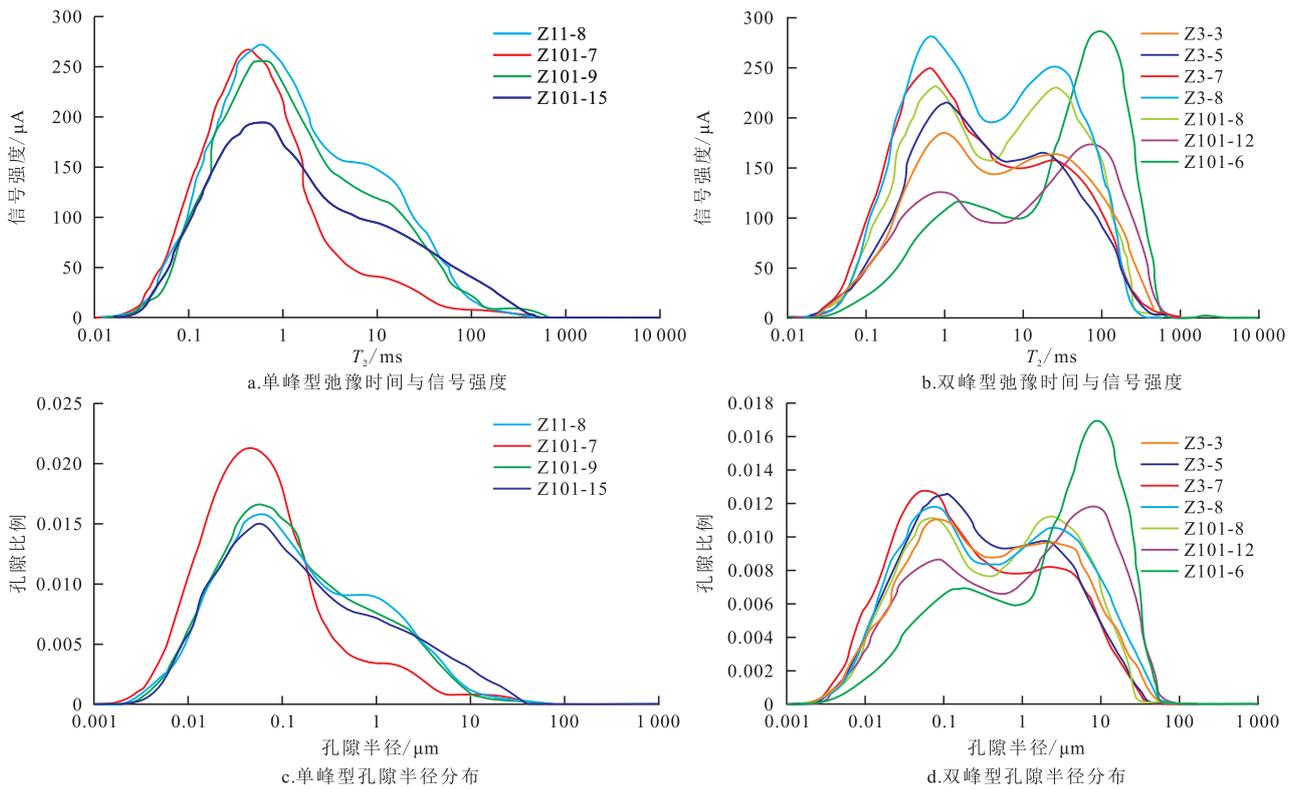


图8 核磁共振弛豫时间与致密砂岩孔隙半径分布  
 Fig.8 NMR relaxation time and pore size distribution of tight sandstones

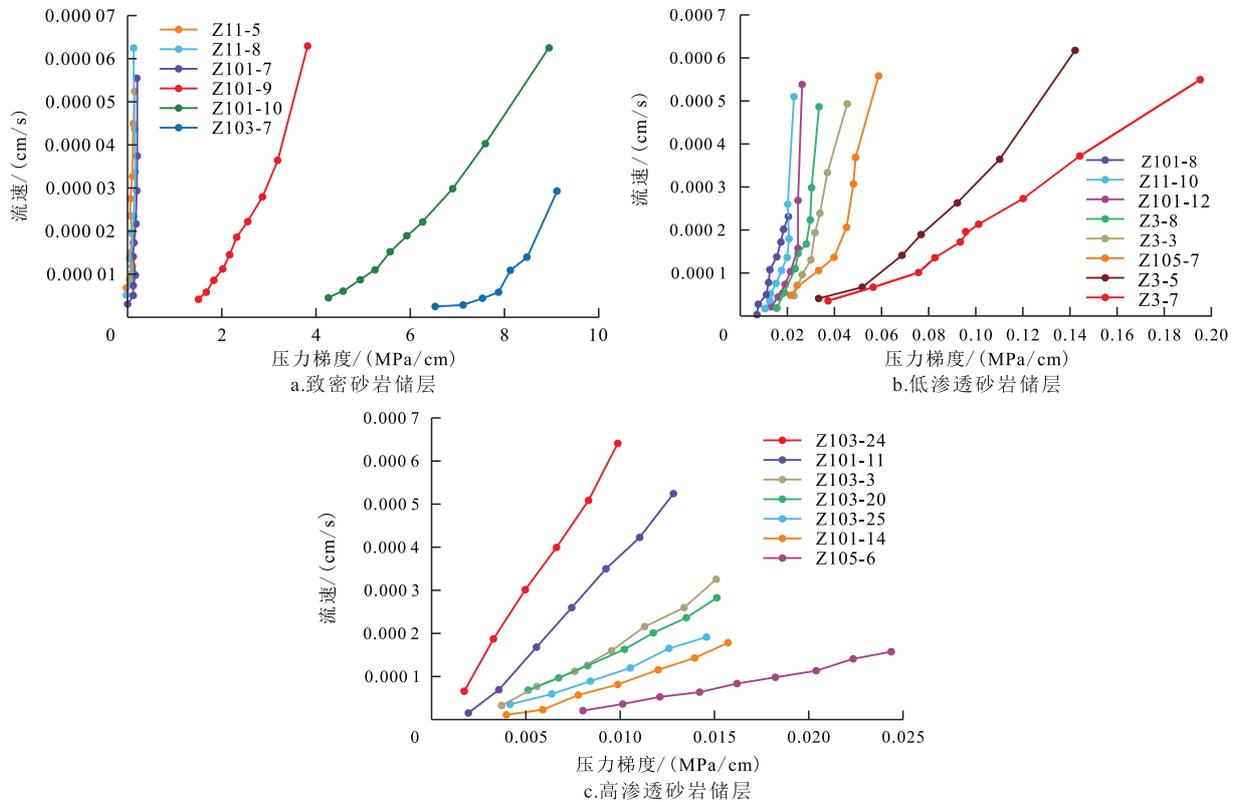


图9 原油充注储层渗流曲线  
 Fig.9 Flow curves of reservoirs charged with crude oil

线。快速增长-稳定型(Ⅲ型)是当充注动力超过充注启动压力梯度后,含油饱和度立即从小于10%快速增至60%~70%并趋于稳定阶段,Z103-25样品是

原油此种充注方式与聚集模式的典型表现。

将聚集模式与砂岩储层参数进行拟合,发现缓慢增长型(Ⅰ型)是致密砂岩-低渗透砂岩的充注模

式,砂岩致密,孔隙和喉道较细小,主要为小孔-微喉砂岩储层,原油运移需要一定的启动压力才能克服较高的毛细管力,这类砂岩储层渗透率一般低于1 mD;快速增长型(Ⅱ型)需要较低的启动压力原油即可在砂岩中充注,主要为大孔-细喉和小孔-细喉的低渗透储层,一般渗透率低于50 mD;快速增长-稳定型(Ⅲ型)基本不需要启动压力原油即可在浮力驱动下聚集成藏,对应于中孔-粗喉型常规砂岩储层。

## 5 油气成藏模式

### 5.1 莫西庄地区

莫西庄地区油藏主要分布在三工河组二段底部和顶部砂体内。由于前期对该地区断层缺乏认识,认为三工河组砂体为岩性尖灭油藏或者致密隔夹层或断层遮挡岩性-构造油藏。经过精细的断层解释,发现莫西庄地区存在一些没有识别的层间小断层,莫西庄地区复杂的油水关系是层间小断层将原本认为是一体的油藏分割封堵导致的。贯穿二叠系烃源岩的穿层断层为来自二叠系烃源岩的原油提供垂向运移通道,进入三工河组砂体后,受到砂体孔隙结构、充注动力综合影响,在砂体中差异充注与聚集,在层间小断层封闭作用和岩性尖灭形成的圈闭中聚集成藏(图10)。

### 5.2 永进地区

与永进地区相邻的征沙村地区油藏主要分布在三工河组二段砂体中,主要为砂体尖灭的岩性油气藏。永进地区三工河组二段砂体厚度大,横向连续稳定分布,致密隔夹层或断层遮挡,形成岩性及岩性-构造油藏;西山窑组在不整合面影响下发育受

断层、不整合面控制的复合油气藏(图11)。在永进地区侏罗系存在数条较大规模走滑断层及相伴的层间小断层,其中较大的走滑断层向下可断至二叠系烃源岩,层间断层断开的层位是三工河组和西山窑组。这些层间小断层整体断距在20 m以内,正如前文所述,这些断层往往起封闭作用。昌吉凹陷二叠系烃源岩在三叠纪—侏罗纪进入生油高峰后,油气沿规模较大的走滑断层进行垂向运移,在储层孔隙和充注动力影响下,在车-莫古隆起南翼以及隆起之上形成古油藏;喜山期的掀斜构造使古隆起之上的油藏遭受破坏,油气向北运移并再次聚集,而古隆起南翼由于为正向调整,古油藏改造作用较弱,有利于原有油藏的保存,再加上后期侏罗系油气的充注而形成混源油藏。

## 6 有利目标预测

### 6.1 莫西庄地区

莫西庄地区在成藏期构造位置较低,后期抬升后位于构造较高部位,局部形成低幅构造梁,成为调整型油藏的有利聚集区域,勘探潜力较大。结合现今有利构造区、有利储层发育区、断块发育区建立有利区预测模型,共预测3个有利目标区。在现今探明储量区域,从单井试油产量以及累积产量来看,区带1、区带2构造高部位仍是评价井部署的重点区带;区带3中构造梁和北部断层与储层发育区处于较有利部位。

### 6.2 永进地区

永进地区西山窑组圈闭埋藏相对较浅,成藏期控圈断层为开启状态,有利于油气充注成藏,现今断层停止活动,断层断距为10~30 m,有利于油气

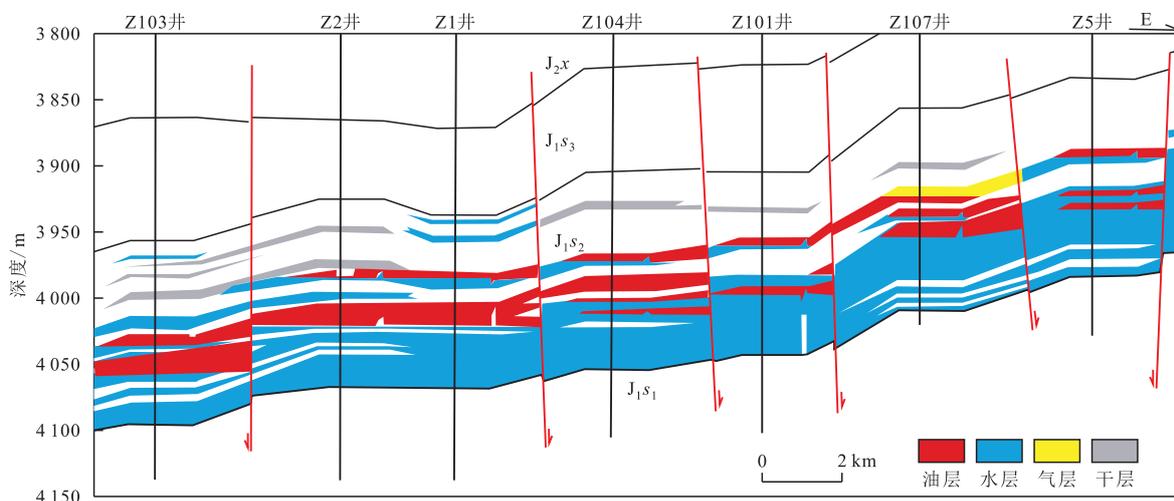


图10 莫西庄地区油气成藏模式  
Fig.10 Hydrocarbon accumulation model in Moxizhuang area

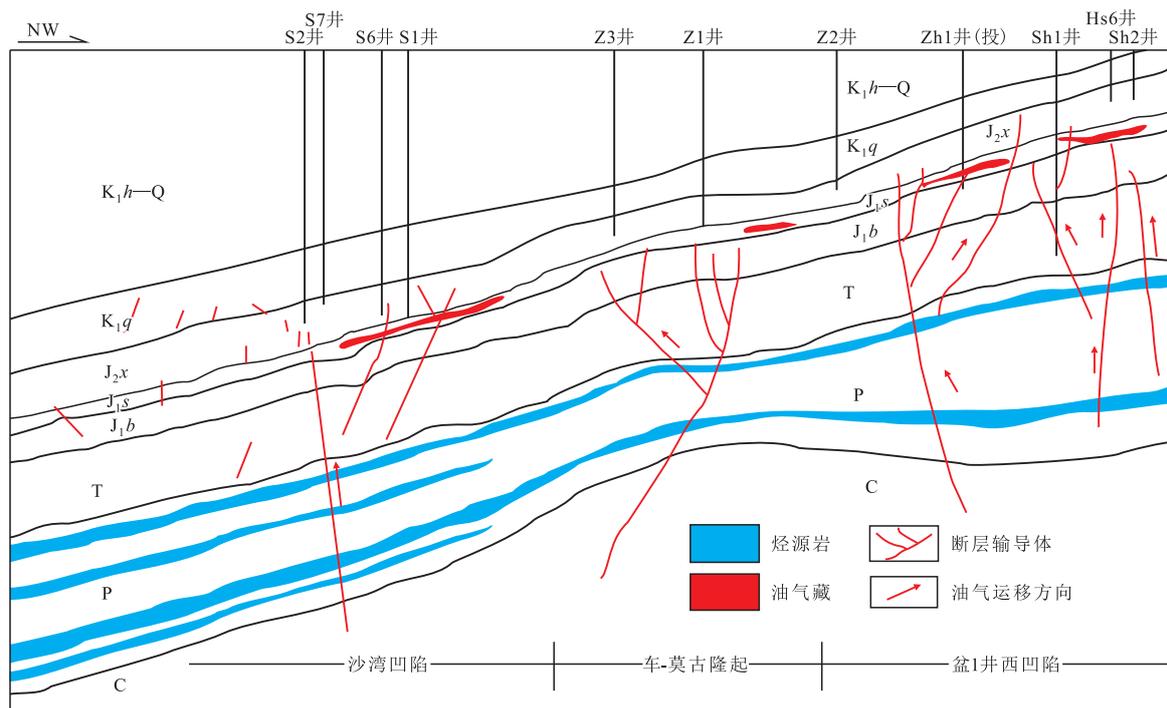


图 11 永进地区侏罗系油气成藏模式  
Fig.11 Hydrocarbon accumulation model in Yongjin area

封堵成藏。另外,目标层系储层发育,且砂体连续性较好,孔隙度为9%~12%,储集条件较好,有利于油气聚集成藏。通过落实永进地区构造圈闭、油源断裂以及储层物性等,并结合成藏期的古构造背景,在准噶尔盆地永进地区预测有利圈闭面积161.6 km<sup>2</sup>,圈闭资源量为5 680×10<sup>4</sup> t。

三工河组以断块圈闭为主,永进地区发育近SN向、近EW向2期走滑断裂,近EW向断裂与主应力方向近乎垂直,垂向封闭性较好,三工河组砂体厚度大,储层发育,小断层较多,封闭性较好,有利于断层遮挡形成圈闭,预测有利圈闭面积219 km<sup>2</sup>,圈闭资源量为9 640×10<sup>4</sup> t。

## 7 结论

(1)规模较大的断层在活跃期起着垂向运移通道的作用,层间小断层活跃程度有限,主要起封闭作用。

(2)储层孔隙细小,喉道窄,孔隙半径为163.8~207.7 μm,平均为179.5 μm,喉道半径为0.5~8.1 μm,平均为3.7 μm;中孔孔隙度占总孔隙度的70%,微孔孔隙度占比为14.5%。

(3)储层含油饱和度与孔隙结构密切相关,微观孔隙结构的非均质性特征控制原油的差异性充注与富集。

(4)油气成藏主要受断层、储层物性与孔隙结构控制。根据成藏模式,预测莫西庄有利目标区3个、永进地区有利目标区2个。

## 参考文献

- [1] 周涛.准中地区断裂体系展布及控藏作用[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.  
ZHOU Tao. The distribution of fault system and its controlling on reservoir in middle of Jungar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [2] 钱福常.乌伦古地区石炭系火成岩岩性特征及其元素地球化学响应[D].徐州:中国矿业大学,2015.  
QIAN Fuchang. Petrological characteristics and element geochemical response of the carboniferous volcanic rocks in Wulungu Area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [3] 陈新,曲国胜,马宗晋,等.准噶尔盆地构造演化分析新进展[J].高校地质学报,2002,8(3):257-267.  
CHEN Xin, QU Guosheng, MA Zongjin, et al. Study on tectonic evolution of Junggar Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 257-267.
- [4] 陈新发,汪新文,马宗晋.准噶尔盆地构造格局与油气区带预测[J].新疆石油地质,2008,29(4):425-430.  
CHEN Xinfa, WANG Xinwen, MA Zongjin. Tectonic frameworks and potential oil-gas traps in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(4): 425-430.
- [5] 刘辉,胡修权,梁家驹,等.准噶尔盆地准中4区块侏罗系断裂特征及对油气成藏的控制作用[J].地质论评,2018,64(6):1489-1504.

- LIU Hui, HU Xiuquan, LIANG Jiaju, et al. Characteristics of Jurassic fault and its control effect on hydrocarbon accumulation in the Block 4 in the middle of the Junggar Basin [J]. *Geological Review*, 2018, 64(6): 1 489-1 504.
- [6] 齐雪峰, 吴晓智, 刘得光, 等. 准噶尔盆地腹部深层构造特征与油气前景[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(2): 111-114.
- QI Xuefeng, WU Xiaozhi, LIU Deguang, et al. The deep structural features and hydrocarbon prospect in hinterland of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(2): 111-114.
- [7] 胡海燕, 陈元勇, 李翻平. 准噶尔盆地腹部深盆气成藏条件及识别标志[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(5): 30-32, 36.
- HU Haiyan, CHEN Yuanyong, LI Fanping. Accumulation elements and recognition symbol of deep basin gas in the center of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(5): 30-32, 36.
- [8] 吴孔友, 查明, 钟建华. 准噶尔盆地超压系统分布及其演化[J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 636-647.
- WU Kongyou, ZHA Ming, ZHONG Jianhua. Distribution and evolution of overpressure systems in the Junggar Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(4): 636-647.
- [9] 陈书平, 漆家福, 于福生. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素[J]. *地质学报*, 2007, 7(2): 151-157.
- CHEN Shuping, QI Jiafu, YU Fusheng. Deformation characteristics in the southern margin of the Junggar Basin and their controlling factors [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 7(2): 151-157.
- [10] 林会喜, 王建伟, 曹建军, 等. 准噶尔盆地中部地区侏罗系压扭断裂体系样式及其控藏作用研究[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3 259-3 268.
- LIN Huixi, WANG Jianwei, CAO Jianjun, et al. Jurassic compression-torsion fault patterns of the central Junggar basin and their controlling role on reservoir [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(12): 3 259-3 268.
- [11] 蔡忠贤. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 431-440.
- CAI Zhongxian. Types and tectonic evolution of Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 431-440.
- [12] 林会喜, 曾治平, 宫亚军, 等. 准噶尔盆地中部油气充注与调整过程分析[J]. *断块油气田*, 2013, 20(3): 316-320.
- LIN Huixi, ZENG Zhiping, GONG Yajun, et al. Process analysis of hydrocarbon charging and adjustment in central area of Junggar Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(3): 316-320.
- [13] HAO F, ZHANG Z, ZOU H, et al. Origin and mechanism of the formation of the low-oil-saturation Moxizhuang field, Junggar Basin, China: implication for petroleum exploration in basins having complex histories [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(6): 983-1 008.
- [14] LI P L, FENG J H, LU Y C, et al. Structure, sedimentation, and petroleum accumulation in the Junggar Basin [M]. Beijing, China: Geological Publishing House, 2010: 340.
- [15] HU H Y, ZENG Z P, LIU J Z, et al. Key elements controlling oil accumulation within the tight sandstones [J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(3): 328-342.
- [16] 陈磊, 杨懿婷, 汪飞, 等. 准噶尔盆地勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(5): 505-518.
- CHEN Lei, YANG Yiting, WANG Fei, et al. Exploration history and enlightenment in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2020, 41(5): 505-518.
- [17] 高长海, 查明, 江汝锋. 火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(4): 1-9.
- GAO Changhai, ZHA Ming, JIANG Rufeng. Evaluation method of comprehensive factor of fault sealing in volcanic rock area [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2017, 41(4): 1-9.
- [18] 陈云锋. 东营凹陷八面河地区西南段断裂输导能力研究[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(S1): 39-45.
- CHEN Yunfeng. A study on fault transporting ability in southwest of Bamianhe in Dongying Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(S1): 39-45.
- [19] 林会喜, 王建伟, 曹建军, 等. 准噶尔盆地中部地区侏罗系压扭断裂体系样式及其控藏作用研究[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3 259-3 268.
- LIN Huixi, WANG Jianwei, CAO Jianjun, et al. Jurassic compression-torsion fault patterns of the central Junggar basin and their controlling role on reservoir [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(12): 3 259-3 268.
- [20] 张金川, 王志欣. 深盆气藏异常地层压力产生机制[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(1): 28-30.
- ZHANG Jinchuan, WANG Zhixin. Formation mechanism of abnormal pressures in deep-basin gas accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 28-30.
- [21] 张义杰, 柳广弟. 准噶尔盆地复合油气系统特征、演化与油气勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 36-39.
- ZHANG Yijie, LIU Guangdi. Characteristics and evolution of composite petroleum systems and the exploration strategy in Junggar basin, northwest China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 36-39.
- [22] LAW B E, SPENCER C W. Abnormal pressure in hydrocarbon environments [R]. In: LAW B E, ULMISHEK G F, SLAVIN V I, eds. *Abnormal pressures in hydrocarbon environments: AAPG Memoir 70*, 1998: 1-11.
- [23] LAW B E. Basin-centered gas system [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1 891-1 919.
- [24] 杨永泰, 王社教, 培东宏, 等. 准噶尔盆地腹部深层成藏条件及勘探领域分析[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 32-34.
- YANG Yongtai, WANG Shejiao, PEI Donghong, et al. An analysis of deep hydrocarbon accumulation conditions and exploratory realms in the heartland of Junggar basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 32-34.
- [25] 郝芳, 邹华耀, 方勇. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 481-488.
- HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yong. The difficulties and frontiers of subtle oil/gas reservoir research [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 481-488.
- [26] MARCHAND A M E, SMALLEY P C, HASEL Dine R S, et

- al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(9): 1561-1571.
- [27] AAGARD P, AHREN J S, HARSTAD A O, et al. Formation of grain-coating chlorite in sandstones: laboratory synthesized vs. natural occurrences [J]. Clay Minerals, 2000, 35(1): 261-269.
- [28] BLOCH S, LANDER R H, BONNELL L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [29] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- HAO Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanism of oil and gas accumulation in overpressured basins [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [30] 谢华锋. 准噶尔盆地莫西庄油田低含油饱和度油藏微观形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- XIE Huafeng. The formation mechanism of low oil saturation reservoirs in Moxizhuang Oilfield, Junggar Basin on micro-scale [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [31] 肖丽华, 孟元林, 侯创业. 松辽盆地升平地区深层成岩作用数值模拟与次生孔隙带预测[J]. 地质论评, 2003, 9(5): 544-551.
- XIAO Lihua, MENG Yuanlin, HOU Chuangye. Diagenetic modeling and prediction of secondary pore zone in the deep of the Shengping Area in the Songliao Basin [J]. Geological Review, 2003, 9(5): 544-551.
- [32] 查明, 陈中红, 张年富, 等. 准噶尔盆地陆梁地区水化学特征与油气运聚[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 413-424.
- ZHA Ming, CHEN Zhonghong, ZHANG Nianfu, et al. Hydrochemical conditions and hydrocarbon accumulation in the Luliang Uplift, Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 413-424.
- [33] 蔡进功, 张枝焕, 朱筱敏, 等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 79-83.
- CAI Jingong, ZHANG Zhihuan, ZHU Xiaomin, et al. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 79-83.
- [34] 曹剑, 张义杰, 胡文. 油气储层自生高岭石发育特点及其对物性的影响[J]. 矿物学报, 2005, 25(4): 367-373.
- CAO Jian, ZHANG Yijie, HU Wen. Developing characteristics of kaolinite in central Junggar Basin and their effect on the reservoir quality [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(4): 367-373.
- [35] 韩文学, 高长海, 韩霞. 核磁共振及微、纳米CT技术在致密储层研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 62-66.
- HAN Wenxue, GAO Changhai, HAN Xia. Application of NMR and micrometer and nanometer CT technology in research of tight reservoir: Taking Chang 7 Member in Ordos Basin as an example [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 62-66.
- [36] 赵华伟, 宁正福, 赵天逸, 等. 恒速压汞法在致密储层孔隙结构表征中的适用性[J]. 断块油气田, 2017, 24(3): 413-416.
- ZHAO Huawei, NING Zhengfu, ZHAO Tianyi, et al. Applicability of rate-controlled porosimetry experiment to pore structure characterization of tight oil reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(3): 413-416.
- [37] 郑可, 徐怀民, 陈建文, 等. 低渗储层可动流体核磁共振研究[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 710-718.
- ZHENG Ke, XU Huaimin, CHEN Jianwen, et al. Movable fluid study of low permeability reservoir with nuclear magnetic resonance technology [J]. Geoscience, 2013, 27(3): 710-718.
- [38] YUAN H H, SWANSON B F. Resolving pore-space characteristics by rate-controlled porosimetry [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(1): 17-24.
- [39] 杜群杰. 基于二维弛豫谱的页岩核磁共振岩石物理方法与实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- DU Qunjie. Shale nuclear magnetic resonance petrophysics methodological and experimental study based on two dimensional relaxation spectra [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.

编辑 林 璐