

源储接触关系及其对近源致密油富集的影响

——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 8_1 油藏为例

肖正录^{1,2,3}, 李勇^{1,3}, 朱志勇⁴, 路俊刚^{1,3}, 卢子兴⁵, 李程善⁵

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 成都 610500;

2. 天然气地质四川省重点实验室(西南石油大学), 成都 610500;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

4. 中石油物资股份有限公司西安分公司, 西安 710000;

5. 长庆油田勘探开发研究院, 西安 710000

摘要:对致密油地质特征的认识已经相对成熟,但对致密油分布规律的认识还有许多急需回答的问题。通过岩心、测井、物性等资料的综合分析,并借助均质储层原油充注动力的理想化模型,研究了源储接触关系对鄂尔多斯盆地陇东地区长 8_1 段近源致密油富集的影响。根据实际地质条件,可将源储接触关系细分为直接接触型、过渡接触型、泥质隔挡型和裂缝沟通型四种类型。其中,直接接触型和裂缝沟通型对致密油的运聚有利,而过渡接触型和泥质隔挡型对致密油的运移具有明显的阻挡作用。陇东地区长 8_1 段致密储层中的油井大多分布于源储间泥质岩层厚度小于4 m的区域内,而水井和干井大多分布于源储间泥质岩层厚度大于4 m的区域内。源储接触关系决定了原油在近源致密储层中的富集程度,在对诸如鄂尔多斯盆地延长组长 8_1 段近源致密油的勘探过程中,不但要寻找利于原油侧向运移的储层“甜点区”,还需重点考虑源储接触关系类型对致密油成藏的影响。

关键词:源储接触关系;富集规律;致密油;延长组;三叠系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Influence of source-reservoir contact conditions on the enrichment of near-source tight oil:

taking Chang 8_1 reservoir in the Longdong area of Ordos Basin as an example

XIAO Zhenglu^{1,2,3}, LI Yong^{1,3}, ZHU Zhiyong⁴, LU Jungang^{1,3}, LU Zixing⁵, LI Chengshan⁵

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,

Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

3. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

4. Xi'an Branch of PetroChina Materials Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China;

5. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract: The geological characteristics of tight oil have been relatively well understood, but there are certain questions needed to be answered regarding the distribution of tight oil. With comprehensive analysis of core, well logging and physical properties, and by means of mathematical calculation, the effects of the source-reservoir contact conditions on the enrichment of near-source tight reservoir of the first section of the eighth member of Yanchang Formation (Chang 8_1) in the Longdong area of Ordos Basin were studied in this paper. Results show that the source-reservoir contact conditions can be classified as four types including direct contact, transitional contact, fracture connected, and mudstone barrier. Among them, the direct contact and fracture connected types are favorable for the migration and accumulation of tight oil, while the transitional contact and mudstone barrier types have an obvious barrier effect for the migration of tight oil. The oil wells in the Chang 8_1 member in the Longdong area are mainly located in regions with a thickness of mudstone barrier less than 4 m, while the water or dry wells are mainly located in regions with a mudstone barrier thickness greater than 4 m. Based on the above

收稿日期:2021-04-30;修订日期:2022-08-01。

作者简介:肖正录(1994—),男,博士,从事油气地球化学和非常规油气地质研究。E-mail:xiaozl@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(41872165, 42002176)资助。

calculation, it can be concluded that the source-reservoir contact condition determines the enrichment and vertical migration distance of tight oil. For the exploration of near-source tight oil, not only the “sweet zone” of the reservoir is conducive, the type of the source-reservoir contact condition should also be considered as a key factor.

Key words: source-reservoir contact relationship; enrichment mechanism; tight oil; Yangchang Formation; Triassic; Ordos Basin

致密油作为一种非常规油气资源,是指储集在覆压基质渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密储层中的石油^[1-3]。致密油的地质特征主要表现在以下 6 个方面:(1)源储共生或近源聚集,无明显的圈闭界限,不受构造控制^[3-4];(2)储集在致密储层中,根据储层致密化与成藏时间之间的关系又可分为“先致密后成藏”、“边致密边成藏”和“先成藏后致密”三种类型^[4-6];(3)成藏动力主要来自于源储之间的流体压差,烃源岩幕式排烃决定了致密油是以“挤牙膏”的形式垂向驱替进入储层^[7-9];(4)非达西流是致密油渗流的主要方式,油气在致密储层中的渗流存在启动压力,只有当充注动力超过启动压力,油气才能在致密储层中流动^[9-11];(5)裂缝和储层微裂缝是致密油渗流的主要通道^[12-13];(6)主要分布于凹陷区及斜坡带,分布面积广,呈连续型或准连续型富集,油水分布复杂,开发成本较高^[3-4,14-15]。

以往学者们在研究致密油成藏主控因素时,都是从致密油的地质特征入手,研究其源储配置关系、烃源岩异常高压或排烃动力、储集层“甜点区”、裂缝有效性等,也有学者以物理模拟或数理推导的方式计算致密油的运移距离和“动力圈闭”^[7-8,16]。

但这些研究往往忽视了致密油最基本的成藏特征,即原油在致密储层中侧向流动性差,以短距离垂向运聚为主^[3-4,9]。这里引申出一个关键的成藏问题:致密油在什么地质条件下能够顺利地由烃源岩经过短距离垂向运移进入储集层聚集?若运移路径上无裂缝沟通,或存在不容易被裂缝贯穿的封堵介质,单纯地研究烃源岩、储集层以及裂缝对致密油的控藏作用,就很难发现致密油的分布规律。

根据致密油行业标准和规范,借鉴国家“十三五”资源评价结果,鄂尔多斯盆地分布于长 7 烃源岩上下的长 6 和长 8 油层组中的大部分资源(除西峰油田长 8、安塞油田长 6、靖安油田长 6 外)属于致密油资源。为解决上述提到的问题,本文以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 8₁ 油藏为例,研究源储接触关系对近源致密油富集的影响作用,以期对致密油分布规律的系统性认识提供理论补充,对致密油的勘探开发提供实践指导。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于我国中部偏北地区,处于中西部构造域的结合部位,整体形状为一南北向延伸的矩形盆地(图 1a)。上三叠统延长组是在盆地持

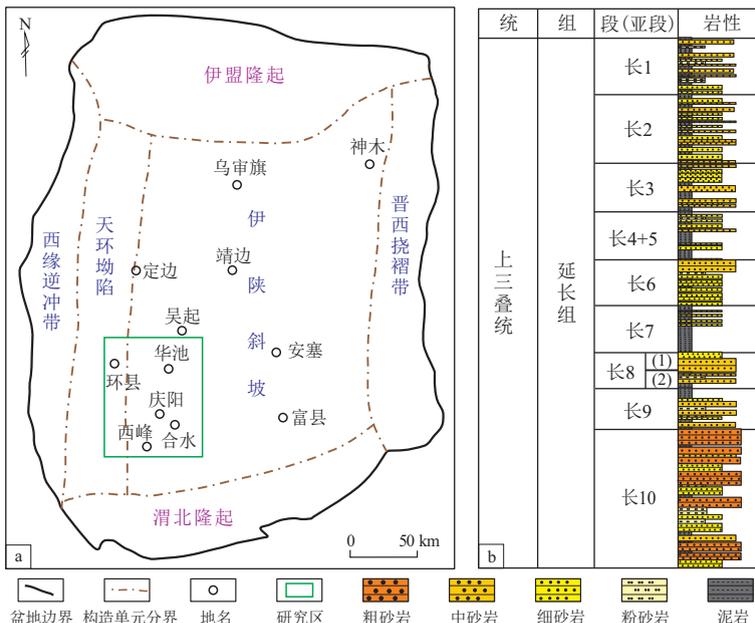


图 1 研究区位置及鄂尔多斯盆地上三叠统延长组地层柱状图

Fig.1 Location of study area and stratigraphic column of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

续发展和稳定沉降过程中沉积的以河流—湖泊相为特征的陆源碎屑岩系,完整地记录下了大型淡水湖盆间歇振荡式湖进、湖退的演化过程。根据沉积旋回,将延长组自上而下划分为 10 个油层组(长 1 段—长 10 段)(图 1b)。其中,长 7 段沉积时为湖盆的鼎盛期,沉积了一套以浅湖—深湖相为主的灰黑色泥页岩,其有机质丰度高,有机质类型以 I 和 II₁型为主,目前正处于成熟生油阶段,具有强大的供烃能力^[12-13]。长 8 段紧邻长 7 段烃源岩下部,以河流相和三角洲平原亚相为主,得益于“满盆含砂”和“近水楼台”的优势,油气资源最为丰富,一直以来是鄂尔多斯盆地的主力勘探目的层^[14-15]。但是,限于长 8 段储集层与长 7 段烃源岩之间形成“上生下储”的成藏模式,成藏动力衰减迅速,油藏的垂向延伸距离较为局限,油藏主要集中在长₈₁亚段储层中,长₈₂亚段及深部储层的含油性普遍较差^[17]。

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部(图 1a),是盆地油气资源最为丰富的地区,发育镇北、环江、西峰、华池、合水等多个亿吨级油田。长 8 段沉积时期,研究区整体上处于三角洲前缘亚相之上,水下分流河道砂体是最有利的油气储集体。由于沉积微相在平面上的变化,陇东地区不同区块的岩性特征、砂体组合和油藏分布情况存在一定差异。

2 致密油成藏动力

2.1 致密油成藏动力来源

原油从烃源岩中生成,经过砂体和裂缝等运移通道的输导,最后进入储层中聚集形成油藏。一直以来,学者们将研究的重心放在储层上,只重视原油的后期聚集,而忽略了烃源岩的初始排烃过程。当认识到致密油的成藏动力来自于源储间的压差^[7-9],加之近些年对页岩油赋存机理方面研究的兴起,烃源岩生、排烃过程中压力的聚集和释放机制逐渐开始得到重视^[8]。目前,学者们认为源储间流体压差主要是由泥岩欠压实作用、水热增压、黏土矿物脱水以及烃源岩生烃增压所引起^[18-23]。考虑到烃源岩排烃事件与压力聚集之间的时间对应关系、各类增压机制能够提供的流体压差量级、以及排烃后烃源岩异常高压值是否随之减小等因素,多数学者认为唯有生烃增压与烃类的生成直接相关,且往往可以累积产生足够的流体压力,是导致烃源岩排烃裂缝网络产生,并使烃源岩内流体得以排出源外的最主要动力来源^[8,24-25]。

致密油从烃源岩排出到近源储层后,还会受到

毛细管阻力和浮力(烃源岩上覆储层中的为动力,下伏储层中的为阻力)的作用。目前研究认为浮力对致密储层中油气运移的作用微乎其微,文献^[7]研究结果显示在原油注入压力为 0.1 MPa、地层倾角为 5°的储层中,靠浮力的作用至少需要 448.5 m 的油柱才能使石油突破毛细管阻力。综上认为,致密油的成藏动力主要为烃源岩生烃增压产生的源储间压差,而成藏阻力主要为储层毛细管力。

2.2 原油排出烃源岩时的临界充注动力

文献^[8-9]用“膨胀力”来描述烃源岩生烃增压下的致密油接力式成藏机制,认为当烃源岩生烃产生的“膨胀力”大于储层中的毛细管阻力,油滴开始向储层发生运移。在这个过程中,推动原油运移的“膨胀力”随原油运移距离的增大而衰减,当膨胀力所能提供的动力与储层毛细管阻力平衡时,则形成一个暂时稳定的油水界面。但烃源岩生烃增压产生的膨胀力到底有多大,烃源岩在幕式排烃过程中膨胀力是如何聚集或释放的,至今没有一套方法对其进行定量表征。本文尝试用一个理想化的均质储层模型来探讨充注动力在近源储层中的衰减机制(图 2):假设烃源岩上覆和下伏储层均质且与烃源岩直接接触,原油在排出烃源岩时(A 点)的临界充注动力为 P_{in} (MPa),充注动力在致密储层中的衰减系数为 J_0 (MPa/m),原油的充注阻力为 P_c (MPa),则储层中离 A 点距离为 L 的 B 点上原油的充注动力 P 可表示为:

$$P = P_{in} - (P_c + J_0 L) \quad (1)$$

充注阻力 P_c 的量化是致密油成藏研究中的关键问题。虽然通过压汞实验可以获得储层的排驱压力,但是油水和汞水之间的界面张力完全不同,因而用压汞实验无法量化石油进入储层时的真实阻力。前人多采用油驱水模拟实验来获得相应的参数^[13,26-27],但局限于实验条件的限制,实验结果难以反映真实的地下情况。如文献^[26-27]模拟

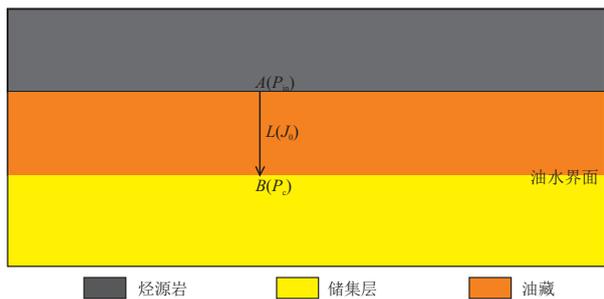


图 2 致密油充注理想化模型

Fig.2 Idealized model of tight oil charging

实验中所用原油黏度普遍大于 $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 与真实的地下条件相差较大, 原油充注相对较难, 获得的充注阻力相对较大; 而文献[13]在模拟实验中忽略了真实地层压力, 原油充注相对容易, 获得的充注阻力偏小。另外, 前人在做实验时加载的初始注油压力普遍较大, 缩短了岩石润湿性变化的时间, 延长了实验时间, 改变了实验的结果。

为此, 本文探索性地设计了一组油驱水实验, 以研究原油在均质致密储层中充注时实际阻力的大小。实验用的样品取自鄂尔多斯盆地陇东地区长8致密储层, 其孔隙度为 7.9% (转换为成藏期的真实孔隙度约为 12.7% ^[5,28]), 渗透率为 $0.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (根据孔渗交会图版^[29]计算可得成藏期真实渗透率约为 $1.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 汞排替压力为 2.18 MPa , 能够代表陇东地区延长组近源致密储层的基本特征。在模拟接近真实地质条件下 (地温 $75 \text{ }^\circ\text{C}$, 煤油稀释后的原油黏度为 $2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 25 MPa 和 72 h 高压饱含地下水, 围压 20 MPa) 注油压力与含油饱和度之间的关系时, 将初始注油压力从 0.1 MPa 缓慢增加以适应储层润湿性的变化过程, 发现当注油压力在 1.0 MPa 之前原油无法进入储层; 当注油压力升至 1.0 MPa 时, 原油开始迅速进入储层, 随着充注时间的增加含油饱和度最终恒定在 60% 左右; 当注油压力增加至 2.0 MPa 以后, 储层含油饱和度随原油注入压力和持续时间的增大不再明显变化, 致密储层的含油饱和度最终恒定在 75% 左右 (图3)。

基于充注实验结果, 将 P_c 定为 1.0 MPa , 根据文献[30-31]的研究结果, 将长8油藏成藏时的 J_0 和 P_{in} 分别定为 $0.06 \text{ MPa}/\text{m}$ 和 6.3 MPa , 将上述值代入式(1), 当储层中某一点的充注动力衰减到与

充注阻力一样时 (此时 $P=0 \text{ MPa}$), 原油的充注距离约为 88.3 m , 这与鄂尔多斯盆地陇东地区延长组下组合的勘探开发实际相吻合。

3 源储接触关系类型

源储接触关系, 顾名思义, 是指烃源岩和储层之间接触的形式, 这个概念和源储配置关系具有一定的相似性, 但两者的侧重点不同。源储配置关系是用来描述烃源岩与储层之间的位置关系, 普遍上划分为源储共生 (亦称之为“三明治”型)、上生下储和下生上储等源储组合类型^[32-33]。虽然部分研究中也提到了源储直接接触利于原油的运聚, 但其研究手段还是将烃源岩和储层分开独立地进行研究, 粗略地认为长8储层与长7烃源岩即构成直接接触关系。源储接触关系侧重于描述烃源岩和储层之间的沟通关系, 笔者团队多次运用此概念对鄂尔多斯盆地延长组油水复杂区的成藏机理做出解释^[14,17,34], 但一直未对其进行系统性总结。本文在以上研究成果的基础上, 将源储接触关系细分为直接接触型、过渡接触型、泥质隔挡型和裂缝沟通型四种类型 (图4), 来深入探讨源储接触关系对致密油富集的影响。

3.1 直接接触型

所谓直接接触型, 是指烃源岩与均质砂岩之间直接接触 (图4a, 图5a-b)。在这种接触关系下, 烃源岩生成的原油可以不受阻挡, 直接进入临近储层发生聚集, 烃源岩提供的初始排烃动力就是原油在储层中的初始充注动力, 原油在储集层中运移的距离完全取决于均质砂体的厚度。如在理想化模型中, 长7烃源岩提供 6.3 MPa 的初始充注动力, 可将 88.3 m 厚的砂体完全充注。但这种源储间的接触关系往往是比较罕见的, 因为沉积环境从静态沉积的泥岩迅速转变为动态沉积的砂岩需要在快速的沉积事件背景下才会发生, 而经历长时间稳定沉积的沉积体, 往往是一个相变接触面积由小到大的缓慢变化过程, 砂泥岩之间的沉积转变需要一定的过渡过程。

3.2 过渡接触型

沉积相、水动力、水深和气候等沉积环境的改变都会引起岩性在纵横方向上的变化, 而且这种变化需要一定的过渡时间。如河流在季节性的改道过程中, 河道间与河道在纵向上表现为冲刷底砾岩的过渡, 在横向上会出现河床向堤岸尖灭的砂纹交错层理^[35], 而双物源交汇处往往会形成频繁的砂泥互层状沉积^[34]。故烃源岩和储集层之间的过渡

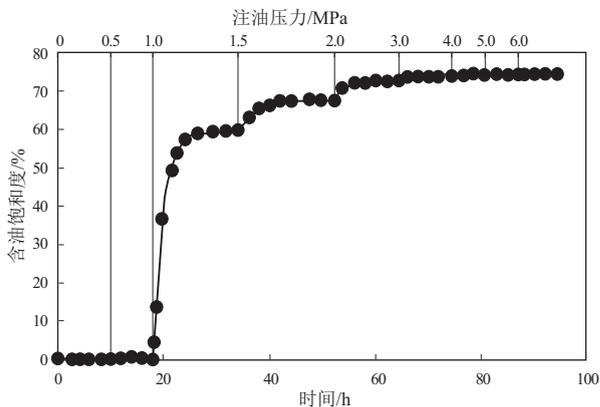


图3 鄂尔多斯盆地陇东地区长8段致密砂岩原油充注实验结果

Fig.3 Experimental results of oil injection into Chang 8 tight sandstone in Longdong area, Ordos Basin

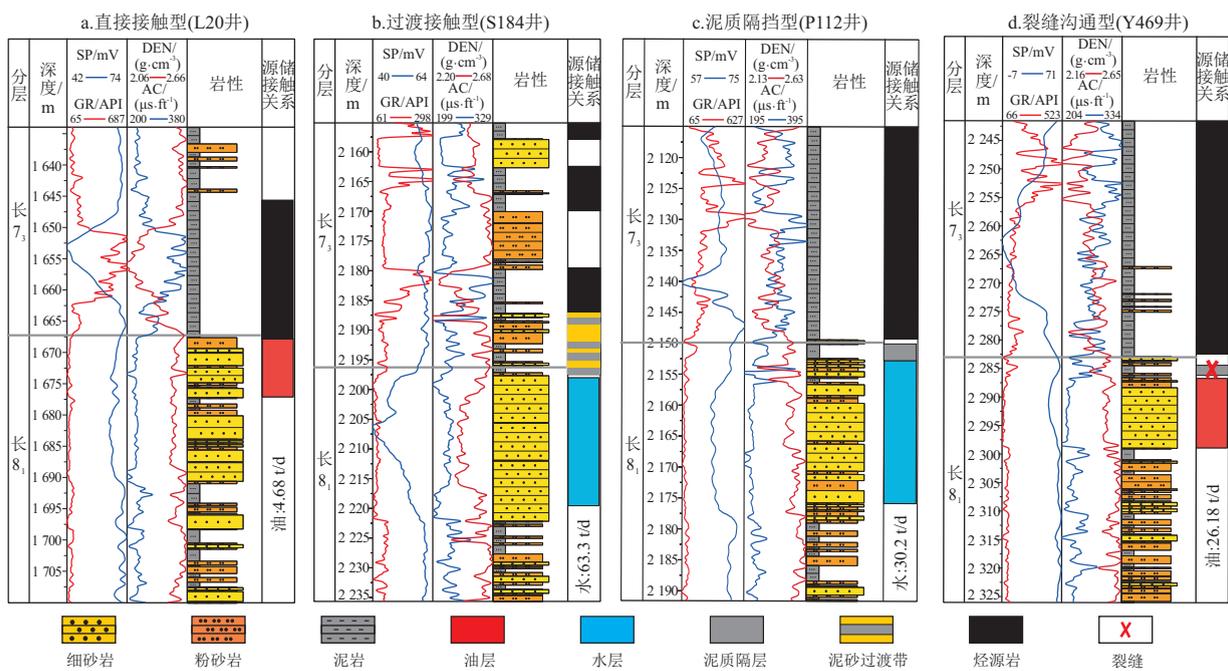


图4 源储接触关系在鄂尔多斯盆地陇东地区典型井上的反映

Fig.4 Reflection of contact relationship between source and reservoir in typical wells in Longdong area, Ordos Basin

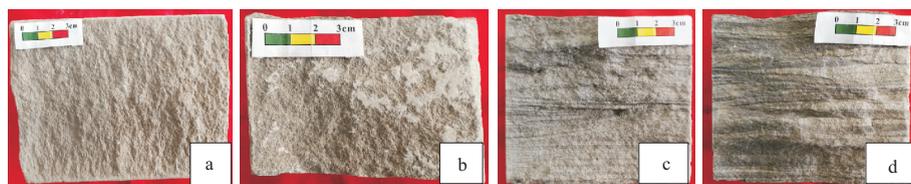


图5 鄂尔多斯盆地延长组近源储层中典型的岩心照片

a.A36井,1 937 m,长6段,细砂岩,块状层理;b.Y71井,2 419.5 m,长6段,细砂岩,块状层理;c.C251井,2 498.6 m,长6段,细砂岩,砂纹层理;d.J22井,2 385.5 m,长6段,细砂岩,砂纹层理

Fig.5 Typical core photos of near-source reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin

带是普遍存在的(图4b,图5c-d)。源储间的过渡带(包括泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、薄砂泥互层等)由于非均质性强而往往具有低的储集性能和高的原油充注阻力。鄂尔多斯盆地陇东地区长₈₁段储层中含泥质纹层砂岩的汞排替压力平均值为5.74 MPa^[35],假设汞水和油水界面张力存在线性关系,则根据均质储层中原油充注阻力为1.0 MPa计算,这种含泥质纹层砂岩的原油充注阻力 P_c 约为2.6 MPa。在这种情况下,原油的启动压力梯度 J_0 约为0.34 MPa/m^[30]。将上述值带入公式(1),则在原油充注动力 P 为0 MPa时,可求得含泥质纹层砂岩中原油的充注距离约为10.88 m。以上推算说明源储间的过渡型砂体具有一定的可充注空间,但会影响原油向深部储层中运聚。

3.3 泥质隔挡型

泥质隔挡型,是指烃源岩和储层间发育有不具备生烃能力的泥岩隔层。前人研究认为那些具有

低泊松比、高弹性模量、富含有机质的脆性泥页岩层段易于产生裂缝,而无生烃能力的纯泥岩在厚度大于4.0 m时无法被裂缝穿透^[36-37]。鄂尔多斯盆地延长组砂岩中天然裂缝发育,而泥岩中裂缝相对不发育,裂缝发育受单砂层厚度控制,通常分布在砂层内,与砂层的界面垂直并终止于砂泥界面上^[37]。笔者在鄂尔多斯盆地延长组钻井取心段中普遍观察到高角度或垂直裂缝在砂泥岩界面处截止或者转向的现象(图6a-f);在鄂尔多斯盆地铜川和宜川地区的野外剖面上可以明显看到发育在长₈段和长₇₁段储层中的裂缝在遇到泥岩层后截止的现象(图6g-h),证实了泥岩对裂缝的拓展具有强的阻碍作用。

为了量化泥质隔层对油气的封堵作用,从陇东地区钻井取心中选取了长₇段烃源岩与长₈₁段储层间的两个泥质样品(B416井,2 118.56 m和B305井,1 996.4 m)做高压压汞实验,测得其进汞

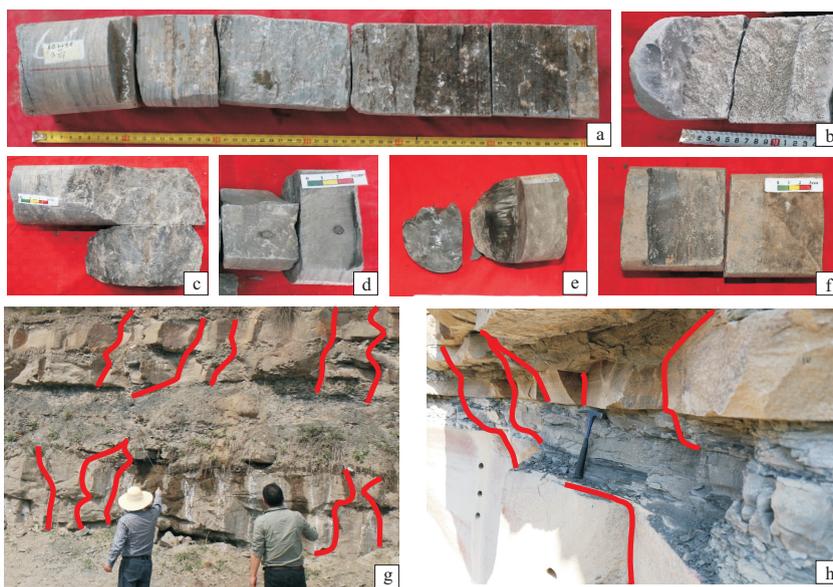


图 6 鄂尔多斯盆地延长组近源储层中岩心和野外剖面中观察到的裂缝照片

a.C269 井,长 6 段,2 448.0~2 448.6 m,裂缝在泥岩段截止;b.Z48 井,长 8 段,1 276.3 m,裂缝在砂泥界面截止;c.B24 井,长 8 段,1 844.8 m,高角度裂缝在泥岩中转向;d.Z82 井,长 6 段,1 255.0 m,裂缝在砂泥界面处搓断;e.P112 井,长 8 段,2 179.8 m,泥岩中的摩擦镜面发生搓断或转向;f.N213 井,长 8 段,1 747.5 m,裂缝发生搓断;g.宜川剖面,长 8 段,裂缝未贯穿 1.2 m 厚的泥岩;h.铜川剖面,长 7₁段,裂缝在 50 cm 厚泥岩处截止

Fig.6 Fractures observed from cores and field sections of near-source reservoir in Yanchang Formation, Ordos Basin

压力分别为 101.8 MPa 与 78.4 MPa,换算为注油压力分别为 46.7 MPa 与 36.0 MPa,远高于源储界面处的最大充注动力。可见,若非裂缝沟通,原油突破泥质隔层向更深处运移是完全不可能的。

3.4 裂缝沟通型

裂缝被公认为是致密油成藏最重要的控藏因素之一,但裂缝在不同岩性中的发育情况不同。本文选取了鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 段储层中的块状砂岩(图 5a-b)和含泥质纹层砂岩(图 5c-d)样品,分别从平行和垂直 2 个方向钻取样品开展岩石三轴力学实验(美国 GTTS 公司研制的 RTR-1000 三轴岩石力学测试系统,依据样品实际埋深,加载的围压为 50 MPa,模拟温度为 90 ℃)。实验结果显示(表 1),均质块状砂岩和含泥质纹层砂岩在垂直层面和平行层面上的抗压强度不同:均质块状砂岩中平行方向的抗压强度大于垂直方向抗压强度,但在泥质纹层砂岩中垂直方向上的抗压强度却高于平行方向的抗压强度。表明在同等受力条件下,均质块状砂岩在垂直层面方向上更容易产生裂缝,而泥质纹层砂岩在平行层面方向更容易产生裂缝。均质块状砂岩和含泥质纹层砂岩是直接接触型和过渡接触型中典型的岩性代表,不同岩性中形成的裂缝不同,指示只用以上三种源储接触关系类型难以全面表征复杂的地质环境,有必要将裂缝划分为单独的源储接触关系类型进行探讨。

表 1 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 段不同构造砂岩力学参数测试结果

Table 1 Test results of mechanical parameters of Chang 6 sandstone samples in Jiyuan area, Ordos Basin

井号	深度/m	岩性	取样方向	抗压强度/MPa
A36	1 937.0	块状砂岩	垂直层面	193.8
A36	1 937.0	块状砂岩	平行层面	197.1
Y71	2 419.5	块状砂岩	垂直层面	181.4
Y71	2 419.5	块状砂岩	平行层面	188.4
C251	2 498.6	含泥质纹层砂岩	垂直层面	177.8
C251	2 498.6	含泥质纹层砂岩	平行层面	164.4
J22	2 385.5	含泥质纹层砂岩	垂直层面	171.3
J22	2 385.5	含泥质纹层砂岩	平行层面	159.6

以鄂尔多斯盆地陇东地区长 8₁油层组为例,取地下水密度 ρ_w 为 1.05 g/cm³,原油密度 ρ_o 为 0.85 g/cm³, $g=9.8$ m/s²,油水界面张力 σ 为 25.5 mN/m,水与岩石润湿角 θ 为 0°,裂缝开度 d 为 40 μ m,裂缝平均长度 h 为 12.0 m^[37-38]。由公式(2)计算裂缝中地下水的浮力和毛细管阻力^[39-40],可得原油在裂缝中的压降仅有 0.026 MPa,这么小的压降相对于初始充注动力来说基本上可以忽略不计。

$$(\rho_w - \rho_o)gh + 2\sigma \cos\theta / (d/2) = P \quad (2)$$

从上面的推算可以看出,即便裂缝的终端是均质高渗砂体 ($P_c = 1.0$ MPa),由于极小的压降 (0.026 MPa),烃源岩提供的充注动力也足以将原

油注入裂缝路径上的任何一套砂体。原油既不服从“裂缝顶端聚集”,也不服从“逐砂推进式成藏”,而更趋向于“全裂缝段砂体同步充注”。裂缝不但能够改善储层的储集性能,还能急剧减小原油运移过程中的充注阻力,使得原油向更深处运聚成藏。

4 源储接触关系影响致密油富集实例

鄂尔多斯盆地陇东地区目前在长₈₁油层组中已经发现了西峰、镇北、环江等大型油田,勘探效果甚好(图7)。但在对其相邻区块的开发过程中却普遍出现位于裂缝集中发育区,储集层规模大但出水的问题,这种现象在华池—上里原—合水一带尤为普遍^[14,17,35]。前文研究认为四种源储接触关系类型中,源储直接接触型和裂缝沟通型利于致密油的垂向运聚,而过渡接触型和泥质隔挡型对裂缝延伸和原油充注具有明显的阻挡作用。陇东地区致密油的差异性富集很可能是由源储接触关系在平面上的差异性造成的。在源储间缺乏含泥质岩层的地区,原油可以通过砂体或裂缝的输导在储层中成藏;而在源储间发育含泥质岩层的地区,裂缝难以拓展,原油无法输导,往往在底部形成干层或水层。

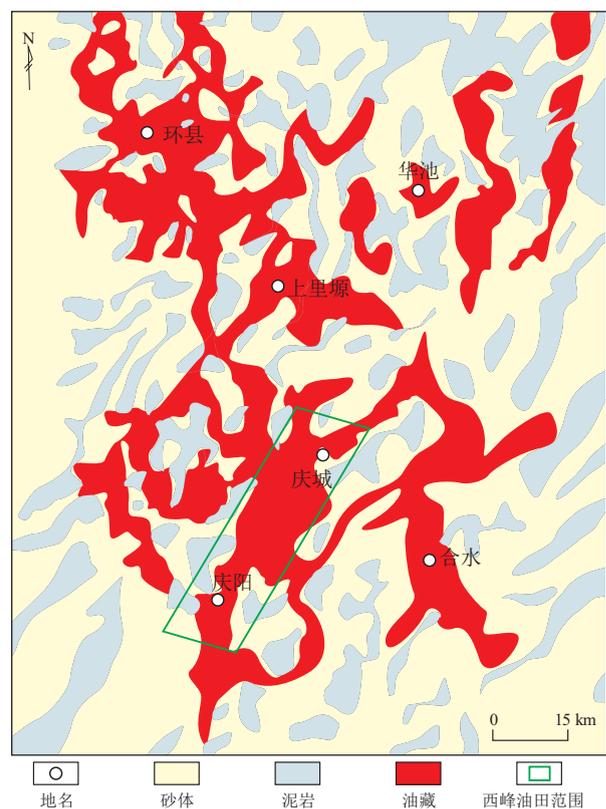


图7 鄂尔多斯盆地陇东地区长₈₁油藏平面分布

Fig.7 Distribution of Chang 8₁ oil reservoir in Longdong area, Ordos Basin

4.1 陇东地区长₈₁油藏平面分布影响因素

为了深入认识源储接触关系对陇东地区近源致密油富集的影响作用,在单井测井解释的基础上,建立陇东地区长₈₁段储层中砂泥岩的解释标准(砂岩的 GR < 98 API, AC < 225 μs/m, DEN < 2.58 g/cm³),随机选取陇东地区 200 余口井,统计长 7 烃源岩底部到长₈₁段测井曲线平直段(储层)顶部之间泥质岩层(包括纯泥岩和泥质纹层)的厚度,并绘制源储间泥质岩层的平面等厚图(图8)。可以看出,除西峰区块(不属于致密油资源)外,陇东地区油井多分布于源储间泥质岩层厚度小于 4 m 的区域内,而水井和干井多分布于源储间泥质岩层厚度大于 4 m 的区域内,说明源储间泥质岩层影响了陇东地区长₈₁段致密油藏的分布。

4.2 西峰油田的特殊性及勘探启示

图8显示西峰油田长₈₁油藏的分布不受源储间泥质隔层的影响,说明不能将源储接触关系用于解释西峰油田的分布。在陇东地区长₈₁储层渗透率平面分布图(图9)上,西峰和华池区块长₈₁储层渗透率处于(0.9~1.1)×10⁻³ μm²以上,储层物性较好;而陇东其他区块长₈₁储层渗透率主要分布在小于0.9×10⁻³ μm²范围之内,储层相对致密。根据

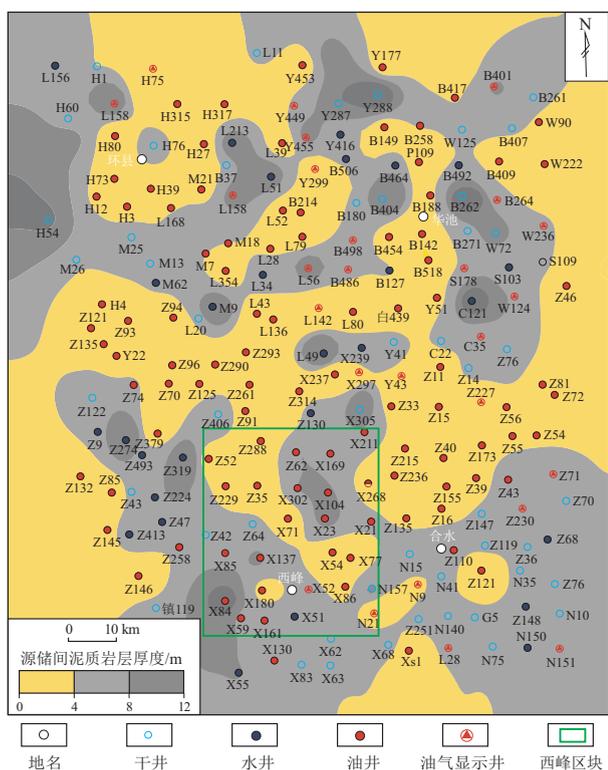


图8 鄂尔多斯盆地陇东地区长7烃源岩与长₈₁储层间泥质岩层等厚图

Fig.8 Isopach map of argillaceous rocks between Chang 7 source rock and Chang 8₁ reservoir in Longdong area, Ordos Basin

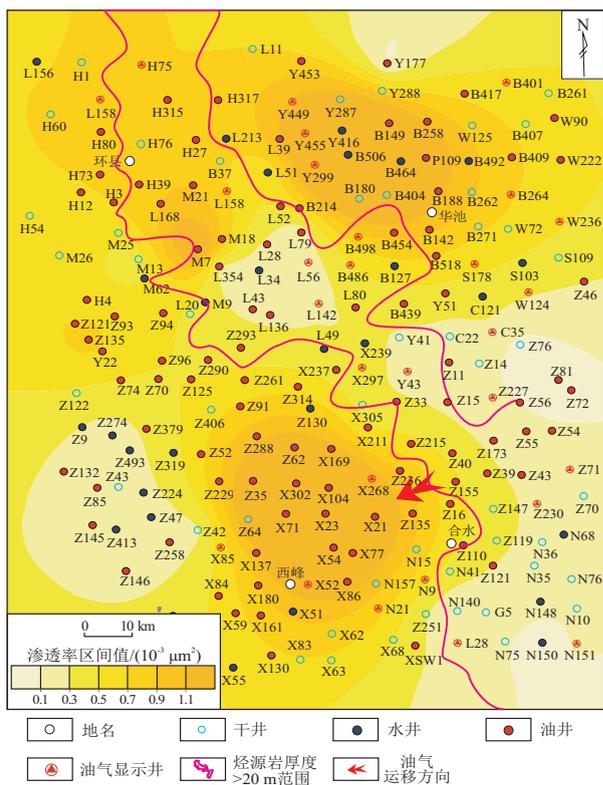


图9 鄂尔多斯盆地陇东地区长₈₁储层渗透率平面分布

Fig.9 Permeability distribution of Chang 8₁ reservoir in Longdong area, Ordos Basin

致密油行业标准和规范,西峰和华池油田长₈₁油藏不属于致密油的范畴。

西峰和华池区块长₈₁储层物性好,意味着原油在储层中具有较好的渗流性能。其中华池地区处于浅水三角洲的沉积末端,为滑塌体或滩坝沉积^[41-42],砂体较为孤立,原油难以侧向运移,油藏在平面上差异性富集,是受到了源储间泥质隔层的阻挡^[17]。而西峰油田属于水下分流河道沉积,砂体侧向连续性好,其不受源储接触关系的影响,推断认为源储间泥质岩层下伏长₈₁储层中的原油是由临近区块烃源岩生成,并经侧向运移而聚集成藏的。现有勘探结果表明,西峰油田长₈₁油藏沿水下分流河道呈长条状展布(图7);而对原油含氮化合物的研究也表明,西峰油田长₈₁油藏中的原油是由东北部的湖盆中部地区烃源岩生成并运移而来^[43],证实了上述推论的科学性。综上可得出启示,在对鄂尔多斯盆地延长组近源储层的勘探中,除了要避开源储间泥质岩层的发育地带,还要寻找利于原油侧向运移的储层“甜点区”。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地延长组长7段烃源岩生烃增压所产生的“膨胀力”为近源致密油的运移提供

了初始充注动力。依据现有研究成果,计算成藏期原油在鄂尔多斯盆地近源致密储层中的充注距离处在88.3 m之内,这与目前鄂尔多斯盆地陇东地区延长组下组合的勘探开发实际吻合。

(2)根据实际地质条件,可将源储接触关系细分为直接接触型、过渡接触型、泥质隔挡型和裂缝沟通型四种类型。其中,源储直接接触型和裂缝沟通型利于致密油的垂向运聚,而过渡接触型和泥质隔挡型对裂缝延伸和原油充注具有明显的阻挡作用。

(3)源储接触关系类型在平面上的差异性影响了近源致密油藏的分布。陇东地区长₈₁油藏多分布于源储间泥质岩层厚度小于4 m的区域内,而水井和干井多分布于源储间泥质岩层厚度大于4 m的区域内。在近源致密油的勘探过程中,不但要寻找利于原油侧向运移的储层“甜点区”,还需重点考虑源储接触关系类型对致密油成藏的影响。

参考文献:

- [1] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [2] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [3] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2013.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [4] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [5] 刘明洁,刘震,刘静静,等.砂岩储集层致密与成藏耦合关系:以鄂尔多斯盆地西峰—安塞地区延长组为例[J].石油勘探与开发,2014,41(2):168-175.
LIU Mingjie, LIU Zhen, LIU Jingjing, et al. Coupling relationship between sandstone reservoir densification and hydrocarbon accumulation: a case from the Yanchang Formation of the Xifeng and Ansai areas, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 168-175.
- [6] 陈世加,姚洁利,路俊刚,等.储层沥青成因及其对油气运聚的影响:以鄂尔多斯盆地华庆地区长8油层组1砂组为例[J].

- 石油与天然气地质,2012,33(1):37-44.
CHEN Shijia, YAO Jingli, LU Jungang, et al. Reservoir bitumen genesis and its impacts on hydrocarbon migration and accumulation: a case study from Chang 8¹ of Yangchang Formation in Huaqing area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1):37-44.
- [7] 李明诚,李剑.“动力圈闭”:低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J].石油学报,2010,31(5):718-722.
LI Mingcheng, LI Jian. “Dynamic trap”: a main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5):718-722.
- [8] SU Kaiming, LU Jungang, ZHANG Huanxu, et al. Quantitative study on hydrocarbon expulsion mechanism based on micro-fracture [J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(6):1901-1913.
- [9] 张焕旭,陈世加,路俊刚,等.“膨胀力”作用下致密砂岩储层石油运聚特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1341-1351.
ZHANG Huanxu, CHEN Shijia, LU Jungang, et al. Migration of oil in tight sandstones: discussion from the dynamics [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(5):1341-1351.
- [10] 高树生,熊伟,刘先贵,等.低渗透砂岩气藏气体渗流机理实验研究现状及新认识[J].天然气工业,2010,30(1):52-55.
GAO Shusheng, XIONG Wei, LIU Xiangui, et al. Experimental research status and several novel understandings on gas percolation mechanism in low-permeability sandstone gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1):52-55.
- [11] 窦宏恩,马世英,邹存友,等.正确认识低和特低渗透油藏启动压力梯度[J].中国科学(地球科学),2014,44(8):1751-1760.
DOU Hongen, MA Shiyong, ZOU Cunyou, et al. Threshold pressure gradient of fluid flow through multi-porous media in low and extra-low permeability reservoirs [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(11):2808-2818.
- [12] 杨华,付金华,何海清,等.鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J].石油勘探与开发,2012,39(6):641-648.
YANG Hua, FU Jinhua, HE Haiqing, et al. Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huaqing, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6):641-648.
- [13] 杨华,梁晓伟,牛小兵,等.陆相致密油形成地质条件及富集主控因素:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(1):12-20.
YANG Hua, LIANG Xiaowei, NIU Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: a case of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1):12-20.
- [14] 陈世加,张纪智,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地华庆地区长8油藏局部油水分布复杂成因分析[J].石油实验地质,2012,34(3):281-284.
CHEN Shijia, ZHANG Jizhi, YAO Jingli, et al. Causes for complex oil and water distribution in parts of Chang 8 reservoir, Huaqing area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3):281-284.
- [15] 陈世加,路俊刚,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地华庆地区长8油层组成藏特征及控制因素[J].沉积学报,2012,30(6):1130-1139.
CHEN Shijia, LU Jungang, YAO Jingli, et al. Characteristics of reservoir formation and the controlling factors of Chang 8 oil-bearing formation in Huaqing area of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6):1130-1139.
- [16] 冯志强,张顺,冯子辉.在松辽盆地发现“油气超压运移包络面”的意义及油气运移和成藏机理探讨[J].中国科学(地球科学),2011,41(12):1872-1883.
FENG Zhiqiang, ZHANG Shun, FENG Zihui. Discovery of “Enveloping Surface of Oil and Gas Overpressure Migration” in the Songliao Basin and its bearings on hydrocarbon migration and accumulation mechanisms [J]. Science China (Earth Sciences), 2012, 55(12):2005-2017.
- [17] 肖正录,陈世加,刘广林,等.有限充注动力背景下致密储层油水差异成藏再认识:以鄂尔多斯盆地华池地区延长组8段为例[J].石油与天然气地质,2020,41(6):1129-1138.
XIAO Zhenglu, CHEN Shijia, LIU Guanglin, et al. Further understanding of differential accumulations of oil and water in tight sandstones with limited charging power: a case study of Chang 8 member in Huachi area, Ordos Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6):1129-1138.
- [18] DURAND B. Present trends in organic geochemistry in research on migration of hydrocarbons [M]//BJORØY M. Advances in organic geochemistry 1981. New York: John Wiley, 1983:117-128.
- [19] ENGLAND W A, MACKENZIE A S, MANN D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(2):327-347.
- [20] HUNT J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. 2nd ed. New York: W. H. Freeman, 1996.
- [21] ESEME E, KROOSS B M, LITTKER R. Evolution of petrophysical properties of oil shales during high-temperature compaction tests: implications for petroleum expulsion [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31(1):110-124.
- [22] KALANI M, JAHREN J, MONDOL N H, et al. Petrophysical implications of source rock microfracturing [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 143:43-67.
- [23] CARDOTT B J, LANDIS C R, CURTIS M E. Post-oil solid bitumen network in the Woodford shale, USA: a potential primary migration pathway [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 139(1):106-113.
- [24] 解习农,李思田,王其允.沉积盆地泥质岩石的水力破裂和幕式压实作用[J].科学通报,1997,42(20):2193-2195.
JIE Xinong, LI Sitian, WANG Qiyun. Hydrofracturing and episodic compaction of muddy rocks in sedimentary basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8):666-669.
- [25] GUO Xiaowen, HE Sheng, LIU Keyu, et al. Oil generation as the dominant overpressure mechanism in the Cenozoic Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(12):1859-1881.
- [26] 郑民,李建忠,吴晓智,等.致密储集层原油充注物理模拟:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组为例[J].石油勘探与开发,2016,43(2):219-227.
ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. Physical modeling of oil charging in tight reservoirs: a case study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum

- Exploration and Development, 2016, 43(2): 219-227.
- [27] 黄文彪, 詹卓琛, 逯瑞敬, 等. 致密油微观充注动态过程及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1197-1204.
HUANG Wenbiao, ZHAN Zhuochen, LU Ruijing, et al. Microscope dynamic process and controlling factors of oil charging in tight reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1197-1204.
- [28] XIAO Zhenglu, CHEN Shijia, LI Yong, et al. The influence of bitumen on reservoir properties and hydrocarbon accumulation in the Chang-8 Member of Huaqing area, Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science and Technology, 2019, 37(1): 103-109.
- [29] 冉新权, 吴胜和, 付晶, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透储层孔隙结构分类研究[J]. 地质学前沿, 2013, 20(2): 77-85.
RAN Xinquan, WU Shenghe, FU Jing, et al. Research on the pore structure classification of low permeability reservoir of the Yan-chang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 77-85.
- [30] 樊建明, 李卫兵, 韩会平, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油启动压力梯度变化规律研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 27-31.
FAN Jianming, LI Weibing, HAN Huiping, et al. Study on variation of the starting pressure gradient of Chang 7 tight oil in Erdos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(28): 27-31.
- [31] 刘震, 朱文奇, 夏鲁, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长8段岩性油藏动态成藏过程[J]. 现代地质, 2013, 27(4): 895-906.
LIU Zhen, ZHU Wenqi, XIA Lu, et al. Research on oil accumulation process of lithologic reservoir in Chang 8 member of Yan-chang Formation, Xifeng Oilfield[J]. Geoscience, 2013, 27(4): 895-906.
- [32] 黄东, 段勇, 杨光, 等. 淡水湖相沉积区源储配置模式对致密油富集的控制作用: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 石油学报, 2018, 39(5): 518-527.
HUANG Dong, DUAN Yong, YANG Guang, et al. Controlling effect of source-reservoir configuration model on tight oil enrichment in freshwater lacustrine sedimentary area: a case study of the Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 518-527.
- [33] 李建忠, 郑民, 陈晓明, 等. 非常规油气内涵辨析、源-储组合类型及中国非常规油气发展潜力[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 521-532.
LI Jianzhong, ZHENG Min, CHEN Xiaoming, et al. Connotation analyses, source-reservoir assemblage types and development potential of unconventional hydrocarbon in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 521-532.
- [34] 陈世加, 雷俊杰, 刘春, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬-吴起地区三叠系延长组6段成藏控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 241-253.
CHEN Shijia, LEI Junjie, LIU Chuan, et al. Factors controlling the reservoir accumulation of Triassic Chang 6 Member in Jiyuan-Wuqi area, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 241-253.
- [35] 肖正录, 陈世加, 廖建波, 等. 河道构型单元及其对油藏的控制作用: 以鄂尔多斯盆地华庆地区长8段储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5): 524-529.
XIAO Zhenglu, CHEN Shijia, LIAO Jianbo, et al. Channel architecture element and its controls on hydrocarbon accumulation: a case study from Chang-8 member in Huaqing area, Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(5): 524-529.
- [36] 商琳, 戴俊生, 冯建伟, 等. 砂泥岩互层裂缝发育的地层厚度效应[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 35-41.
SHANG Lin, DAI Junsheng, FENG Jianwei, et al. Effect of strata thickness on fracture development in sand-mud interbed[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 35-41.
- [37] 樊建明, 屈雪峰, 王冲, 等. 鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 740-748.
FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 740-748.
- [38] 公言杰, 柳少波, 朱如凯, 等. 致密油流动孔隙度下限: 高压汞技术在松辽盆地南部白垩系泉四段的应用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 681-688.
GONG Yanjie, LIU Shaobo, ZHU Rukai, et al. Low limit of tight oil flowing porosity: application of high-pressure mercury intrusion in the fourth member of Cretaceous Quantou Formation in southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 681-688.
- [39] 林景晔, 许利群, 杨辉. 石油聚集成藏的物理学原理: 毛-浮方程[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(1): 22-25.
LIN Jingye, XU Liqun, YANG Hui. Physical principle of petroleum accumulation and reservoir forming: capillary-buoyancy equation[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(1): 22-25.
- [40] 张雪峰, 杨时雨, 王亚玲, 等. 姬塬地区延长组长8₁地层水产状与成因分析[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(6): 84-88.
ZHANG Xuefeng, YANG Shiyu, WANG Yaling, et al. Occurrence and genesis analysis of Chang 8 formation in Jiyuan area[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(6): 84-88.
- [41] 侯明才, 李旭, 邓敏. 鄂尔多斯盆地环县地区三叠系长8—长6油层组沉积相特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 241-248.
HOU Mingcai, LI Xu, DENG Min. Study on the sedimentary environment of Chang 8-6 oil-bearing formations of Yanchang Formation in Huanxian area, Ordos Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(3): 241-248.
- [42] 楚美娟, 郭正权, 白嫦娥. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组沉积及其演化特征[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(2): 13-18.
CHU Meijuan, GUO Zhengquan, BAI Change. Sedimentation and evolution features in Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(2): 13-18.
- [43] 段毅, 张辉, 吴保祥, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油含氮化合物分布特征与油气运移[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 17-20.
DUAN Yi, ZHANG Hui, WU Baoxiang, et al. Distribution of nitrogen compounds and migration of the oils in the Xifeng Oilfield, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 17-20.