

文章编号: 0253-2697(2025)06-1126-18 DOI:10. 7623/syxb202506007

鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组 7 段致密储层石油多尺度运移机制、成藏效应及富集模式

王福伟^{1,2} 陈冬霞^{1,2} 姜梦雅^{1,2} 完玛仁增^{1,2} 刘 晨^{1,2}
王翹楚^{1,2} 王昱超^{1,2} 荣澜熹^{1,2} 王玉杞^{1,2} 成 铭³

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油长庆油田公司长北作业分公司 陕西西安 710018)

摘要: 针对鄂尔多斯盆地延长组 7 段(长 7 段)致密储层内石油的多尺度运移机制不清以及成藏效应不明的问题,以姬塬地区为例,系统开展了运移尺度类型划分、原油赋存、含油性、可动性以及产能评价对比,揭示了不同运移尺度下的原油充注运聚机制及成藏差异性。研究结果表明:①长 7 段致密砂岩储层内的石油运移可划分为厘米—米级小尺度垂向运移、十米—百米级中尺度垂向运移、千米级大尺度侧向运移 3 种类型;②小尺度垂向运移的发生取决于源-储界面上的垂向动力-阻力差异,原油的富集程度受源-储组合及储层质量控制,具有饱和烃含量低、轻重比较小、轻重组分赋存的孔径范围差异大的特征,储层含油性及其可动性均随砂体厚度的增大而增强,以储夹源型储层的产能较好;③中尺度垂向运移和大尺度侧向运移的油气在源-储过剩压力差驱动下分别沿高角度构造裂缝和侧向连通砂体进行,原油的富集均受储层质量与运移距离制约;④随着运移距离的增加,原油饱和烃含量与轻重比逐渐增大,轻重组分赋存的孔径范围逐渐重合,储层含油性逐渐降低而可动油占比逐渐增高,最终在中尺度垂向运移的长 7 段 2 亚段内部和大尺度侧向运移的 1~10 km 区间表现出更好的产能。多尺度运移现象及成藏效应能合理地解释长 7 段致密储层中原油的差异赋存、分布及富集特征,对于完善致密储层甜点的评价并进一步指导勘探开发具有参考价值。

关键词: 多尺度运移;成藏效应;致密储层;延长组 7 段;姬塬地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122. 3

文献标识码: A

Multi-scale migration mechanism, accumulation effect and enrichment mode of tight oil reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin

Wang Fuwei^{1,2} Chen Dongxia^{1,2} Jiang Mengya^{1,2} Wanma Renzeng^{1,2} Liu Chen^{1,2}
Wang Qiaochu^{1,2} Wang Yuchao^{1,2} Rong Lanxi^{1,2} Wang Yuqi^{1,2} Cheng Ming³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Changbei Operating Company,
PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China)

Abstract: This study aims to solve the problem of unclear multi-scale migration mechanism and hydrocarbon accumulation effect of tight oil reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin. Taking the Jiyuan area as an example, a systematical analysis is carried out on the migration scales division, crude oil occurrence, petroliferous properties, mobility and productivity evaluation, thereby revealing the oil enrichment mechanism and hydrocarbon differential accumulation under multi-scale migration. The results show as follows. (1) Oil migration of tight sandstone reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation can be divided into three types: vertical migration at the centimeter to meter scale (small-scale), vertical migration at the ten meter to one hundred-meter scale (medium-scale), and lateral migration at the kilometer scale (large-scale). (2) The occurrence of small-scale vertical migration depends on the dynamic-to-resistance difference at the source-reservoir interface, and the oil enrichment degree is controlled by the source-reservoir assemblage and reservoir quality. Correspondingly, tight oil is characterized by low saturated hydrocarbon content, small ratio of light to heavy component, and the large aperture difference of light and heavy components. In addition, the oil content and fluid mobility of tight reservoirs are enhanced with the increase of sand thickness, and the tight reservoir with the source sand-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42402152)、中国石油大学(北京)科研基金项目(2462023XKBH011)和中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-02-01-03)资助。

第一作者: 王福伟,男,1996年1月生,2023年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)博士后,主要从事油气藏形成机理与分布规律研究。Email: wangfw_cup@163.com

通信作者: 陈冬霞,女,1974年11月生,2003年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事油气藏形成机理与分布规律方面的教学和科研工作,Email: lindachen@cup.edu.cn

wiched between reservoirs has the best productivity. (3) Driven by the source-reservoir excess pressure difference, the medium-scale vertical migration and large-scale lateral migration of oil are along the high-angle structural fractures and the laterally connected sand bodies, respectively. The oil enrichment is controlled by reservoir quality and migration distance. (4) With the increase of migration distance, the saturated hydrocarbon content and the ratio of light to heavy component of crude oil gradually increase, the occurrence aperture distribution of light and heavy components gradually coincides, and the oil content gradually decreases while the proportion of mobile oil gradually increases. Ultimately, these factors lead to better productivity in the second submember of Member 7 of Yanchang Formation by medium-scale vertical migration and the interval from 1 km to 10 km by large-scale lateral migration. The multi-scale migration and hydrocarbon accumulation effect can reasonably explain the differential occurrence, distribution and enrichment characteristics of tight oil reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation, which provides a reference for improving the evaluation of tight reservoir sweet spots and guiding hydrocarbon exploration and development.

Key words: multi-scale migration; accumulation effect; tight reservoir; Member 7 of Yanchang Formation; Jiyuan area; Ordos Basin

引用:王福伟,陈冬霞,姜梦雅,完玛仁增,刘晨,王翹楚,王昱超,荣澜熹,王玉杞,成铭. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组7段致密储层石油多尺度运移机制、成藏效应及富集模式[J]. 石油学报, 2025, 46(6): 1126-1143.

Cite: WANG Fuwei, CHEN Dongxia, JIANG Mengya, WANMA Renzeng, LIU Chen, WANG Qiaochu, WANG Yuchao, RONG Lanxi, WANG Yuqi, CHENG Ming. Multi-scale migration mechanism, accumulation effect and enrichment mode of tight oil reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(6): 1126-1143.

由于源-储空间配置及输导通道的差异,含油气盆地内普遍存在油气沿水平或垂直方向的多尺度运移,并导致包括源内、近源、远源等不同运移距离或空间跨度下的油气聚集成藏^[1-5]。目前,国内外研究已提出流体势^[6-7]、地质色层效应^[8-9]等油气运移关键理论,形成了对应的地质综合研究^[10]、物理模拟^[11-12]、地球化学示踪^[13-14]和数值模拟分析方法^[15-16]。流体势理论通常通过与数值模拟、成藏地质分析相结合来正向判断油气运移的趋势及方向,而地质色层效应理论的基本思路则主要是利用典型地球化学指标的变化规律来追踪油气运移的方向和距离^[6-10]。物理模拟方法是通过物理模拟实验从动态、立体、可视及定量的角度揭示油气运移成藏过程^[11-12]。上述经典理论和方法不仅是常规油气运聚的基本理论和研究手段,也是指导非常规油气差异富集理论认识的基础。由于多尺度运移现象在致密储层内同样存在,加之油气运移过程中往往伴随着原油组分^[17]、含油性^[18]以及可动性变化^[19-21],因此多尺度运移研究对于揭示致密储层内原油的差异富集规律和开展地质甜点优选具有重要意义。

前人主要从油气充注的动力-阻力^[22-24]、源-储组合(或配置)^[3, 25-26]、输导通道^[4, 27-28]、储层质量^[29-31]等方面对致密储层内的原油充注运聚过程进行总结,揭示了在单一地质因素或单一运移尺度控制下的原油富集规律,但少有学者对油气的多尺度运移开展系统对比分析,这使得研究者对致密储层中不同运移尺度的原油充注运聚机制及其成藏差异性认识不清。多尺度运移过程对原油的赋存状态、含油性、可动性以及产能差异性的控制作用不明,为后续的精細油藏评价及甜点优选带来了挑战。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段(长7段)是中

国非常规油气勘探的重点层段^[32]。长7段不仅发育供烃能力差异较大的黑色页岩和暗色泥岩^[33-34],同时也发育重力流、三角洲等不同沉积体系的致密砂岩储层^[35-37]。前人研究证实,长7段致密储层内广泛发育高角度构造裂缝^[38-40],加之连通砂体的侧向输导^[41],使得致密储层内的原油运聚过程十分复杂。相较于源-储紧邻的短距离原油充注而言,长7段的油气还存在沿构造裂缝的垂向运移和沿连通砂体的长距离侧向运移,其运移尺度或空间跨度较大,为储层甜点评价及优选带来了不确定性。因此,厘清致密储层内石油的多尺度运移及成藏效应对于明确未来勘探方向至关重要。

笔者对鄂尔多斯盆地姬塬地区的长7段开展了精细解剖,通过系统划分不同运移尺度类型,厘清了致密储层内不同运移尺度下的原油充注运聚机制,阐明了多尺度运移过程对于原油赋存、含油性、可动性以及产能特征的影响,以期为研究区及其他含油气盆地致密储层的精细地质甜点评价和勘探开发提供理论指导。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是中国典型的克拉通盆地,可划分为伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断带、天环坳陷、晋西挠褶带和伊陕斜坡6个构造单元^[42],面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ [图1(a)]。盆地在晚三叠世沉积的延长组是目前最主要的生油与储油层系。其中,长7段为研究的重点层段,依据沉积旋回及岩性变化,可将长7段自下而上划分为长7段3亚段、长7段2亚段和长7段1亚段共3个亚段^[43][图1(b)]。长7段3亚段沉积期以半深湖—深湖亚相沉积为主,发育厚度较大且连续分布的富有机质黑色页岩;长7段2亚段和长7段1

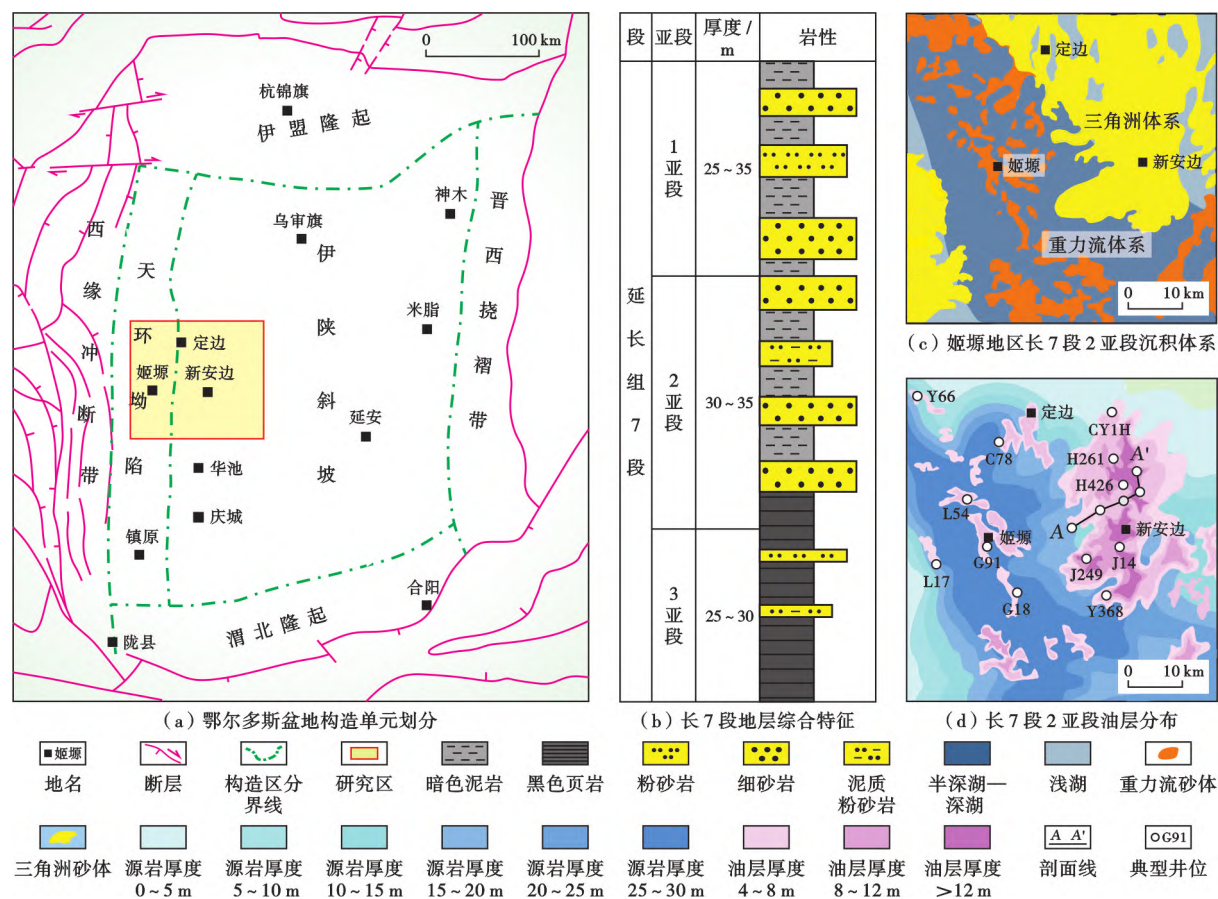


图1 姬塬地区构造位置、长7段地层特征、长7段2亚段沉积体系以及源岩与油层的叠合分布

Fig. 1 Tectonic location, stratigraphic characteristics of the Member 7 of Yanchang Formation, sedimentary system of the second submember of Member 7 of Yanchang Formation, and overlapping distribution of source rock and oil layer in Jiyuan area

亚段沉积期,由于湖水逐渐变浅,以沉积有机质丰度相对较低的暗色泥岩为主^[44]。研究区为姬塬地区,位于伊陕斜坡中西部,其中,长7段在其东部新安边地区发育三角洲沉积砂体而在其西部地区发育重力流沉积砂体^[45],这些致密砂体与烃源岩呈直接接触或间接沟通,形成了大面积的原油聚集[图1(c)],勘探开发潜力巨大。研究区长7段储层自早白垩世早期(距今140 Ma)开始达到致密上限^[46],油气大规模充注时间在早白垩世早期至晚期(距今130~100 Ma)^[46-47],整体表现为“先致密后成藏”的特点。

2 致密储层内的石油运移尺度及类型

致密储层内的原油充注往往伴随着沿水平或垂直方向的多尺度(或距离)运移。笔者所强调的“尺度”更多是指空间跨度或距离,其中,既包括源-储直接接触的厘米—米级油气小距离运移,也涵盖源-储通过垂向裂缝网络或侧向连通砂体间接沟通的百米—千米级油气运移。根据鄂尔多斯盆地长7段内部的源-储配置关系及运移距离的差异,笔者将姬塬地区长7段内所有的原油运移归纳为微尺度、小尺度、中尺度和大尺度4个类型(图2)。

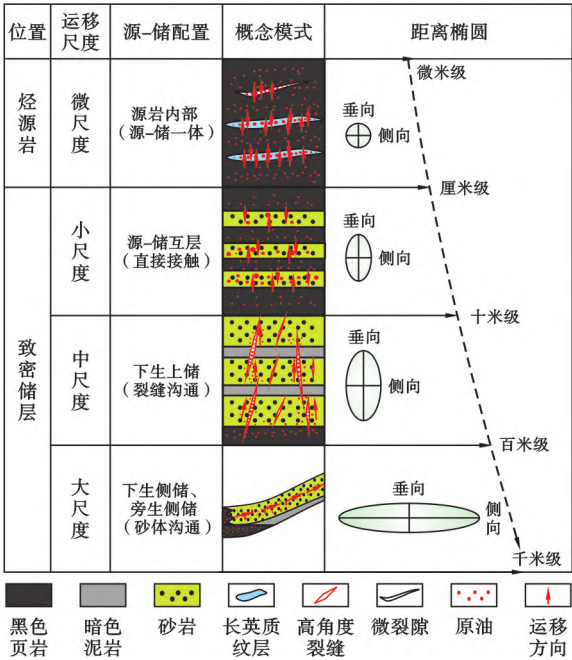


图2 姬塬地区长7段致密储层原油的不同运移尺度

Fig. 2 Conceptual model of different migration scales of tight oil reservoir of the Member 7 of Yanchang Formation, Jiyuan area

微尺度运移指发生在源岩内部的微米—毫米级的原油运移,表现为原油从生烃能力较强的部位向生烃能力弱或不具备生烃能力、储集性能较好的纹层及页岩缝中运移聚集^[48-49]。此类油气运移主要发生在长7段3亚段的黑色页岩内部^[21],属于严格意义上的页岩油范畴。

小尺度运移指发生在与源岩直接接触的致密储层中的厘米—米级原油运移,表现为源岩中生成的原油垂向充注到相邻的致密储层中,源-储配置上具有典型的源-储互层或“三明治”特征。此类运移主要发生在盆地中心,研究区以西西部重力流沉积体系为典型,其中,长7段1亚段和长7段2亚段内均表现为黑色页岩与致密砂岩互层,砂体的侧向连续性差,其内的油气以小尺度垂向运移为主。

中尺度运移指通过裂缝网络沟通而发生的垂向上十米—百米级的原油运移,源-储配置上表现为下生上储(或上生下储)。长7段主要发育下生上储型配置,此类运移主要发生在重力流与三角洲沉积体系的过渡区域,其中,长7段3亚段发育黑色页岩,长7段1亚段和长7段2亚段发育暗色泥岩,存在叠置砂体与构造裂缝,具备发生中尺度垂向运移的条件。

大尺度运移指通过几何连通砂体发生的侧向千米级原油运移,油气的最大运移距离可达几十千米,源-储配置上表现为下生(或旁生)侧储。此类油气运移主要发生在研究区东部的新安边地区三角洲沉积体系。尽管该地区自身暗色泥岩的供烃能力较弱,但由于其侧向砂体呈连片分布且与盆地中心的黑色页岩存在接触,油气具备大尺度侧向运移的有利条件。

值得注意的是,不同油气运移尺度的级别界定主要基于鄂尔多斯盆地长7段实际地质条件进行。就微尺度运移而言,主要发生在长7段3亚段富有机质页岩的纹层组合内部,其中,纹层单层厚度主要为0.1~9.0 mm,平均厚度约为3.0 mm^[50-51],因而将微尺度运移的级别确定为微米—毫米级。长7段的小尺度垂向运移主要发生在富有机质页岩所夹持的致密砂岩储层中,其中,单砂体的厚度主要为0.05~14.00 m,平均厚度约为6 m^[31],故将小尺度垂向运移的级别限定在厘米—米级。研究区的中尺度垂向运移主要表现为下部长7段3亚段烃源岩生成的原油向上部长7段2亚段和长7段1亚段致密储层中充注运移,这2个亚段的累计地层厚度多分布在40~100 m,故将中尺度垂向运移的级别限定在十米—百米级。大尺度侧向运移发生在区域上呈侧向连通且横向上展布范围较大的砂体中,其平面距离普遍达到千米以上,因此将大尺度侧向运移的单位范围确定为千米级。在实际应用中,不

同运移尺度的级别也可根据实际研究盆地的地质情况进行适当调整。

3 致密储层中石油的多尺度运移聚集机制

致密储层内的原油运移因源-储配置和输导通道的差异而呈现出不同的充注、运聚过程。笔者从充注条件、输导通道和储层质量等方面入手,对长7段致密储层内原油的多尺度充注、运聚机制进行了系统梳理,可为分析致密储层内原油差异富集的主控因素及选区评价提供参考。

3.1 小尺度垂向充注、运聚机制

由于小尺度运移多发生在源岩与致密储层直接接触的源-储配置中,源-储界面上垂向动力与阻力的差值(动阻力差)是影响原油充注能否发生的关键。鄂尔多斯盆地长7段烃源岩在成藏期普遍存在古超压^[52-54],该超压所导致的源-储过剩压力差成为了致密储层内原油充注、运聚的主要动力^[1-3]。前人以去除有机质贡献的声波时差和密度资料为依据,利用声波时差—密度交会图法^[52]确定了生烃导致的流体膨胀增压是研究区长7段成藏期超压的主要来源^[53-54]。此外,研究区的长7段在油气成藏期(早白垩世)的埋藏深度最大,尽管地层在后期经历了一定程度的构造抬升过程,但其内的烃源岩成熟度、有机质类型和有机质丰度等通常不会在抬升过程中发生显著变化。笔者综合考虑资料的完整程度和方法适配程度,采用Guo等^[55]提出的定量模型对烃源岩的生烃增压进行了评价。生烃增压定量评价的计算公式为:

$$\Delta p = \frac{AFM_k[\alpha D(1 - p_h C_o) - 1]}{C_w \phi_w \rho_k + (1 - AF)C_k M_k + \alpha AFM_k DC_o} \quad (1)$$

笔者在具体评价过程中假设油气充注前的储层过剩压力为0 MPa,因此,可采用生烃增压来近似表征源-储间的过剩压力差。

运移阻力主要来自于致密砂岩储层的毛细管力。由于压实作用不可逆性,致密储层在抬升过程中的孔隙回弹作用较为有限,这使得现今储层的物性与成藏期(或最大埋深期)的储层物性在理论上较为接近,因而主要采用现今储层物性来评价运移阻力。笔者通过拟合121件致密储层样品在实验条件下的排驱压力与储层孔渗性之间的关系来建立数学模型,进而获得实际油水条件下的排驱压力。需要注意的是,受储层结构的各向异性影响,平行层理方向的水平渗透率普遍大于垂直于层理方向的垂直渗透率^[2,56-57],这使得垂向充注阻力要明显大于水平阻力[图3(a)]。考虑到在源-储界面上的原油充注以垂向为主,加之垂向渗透

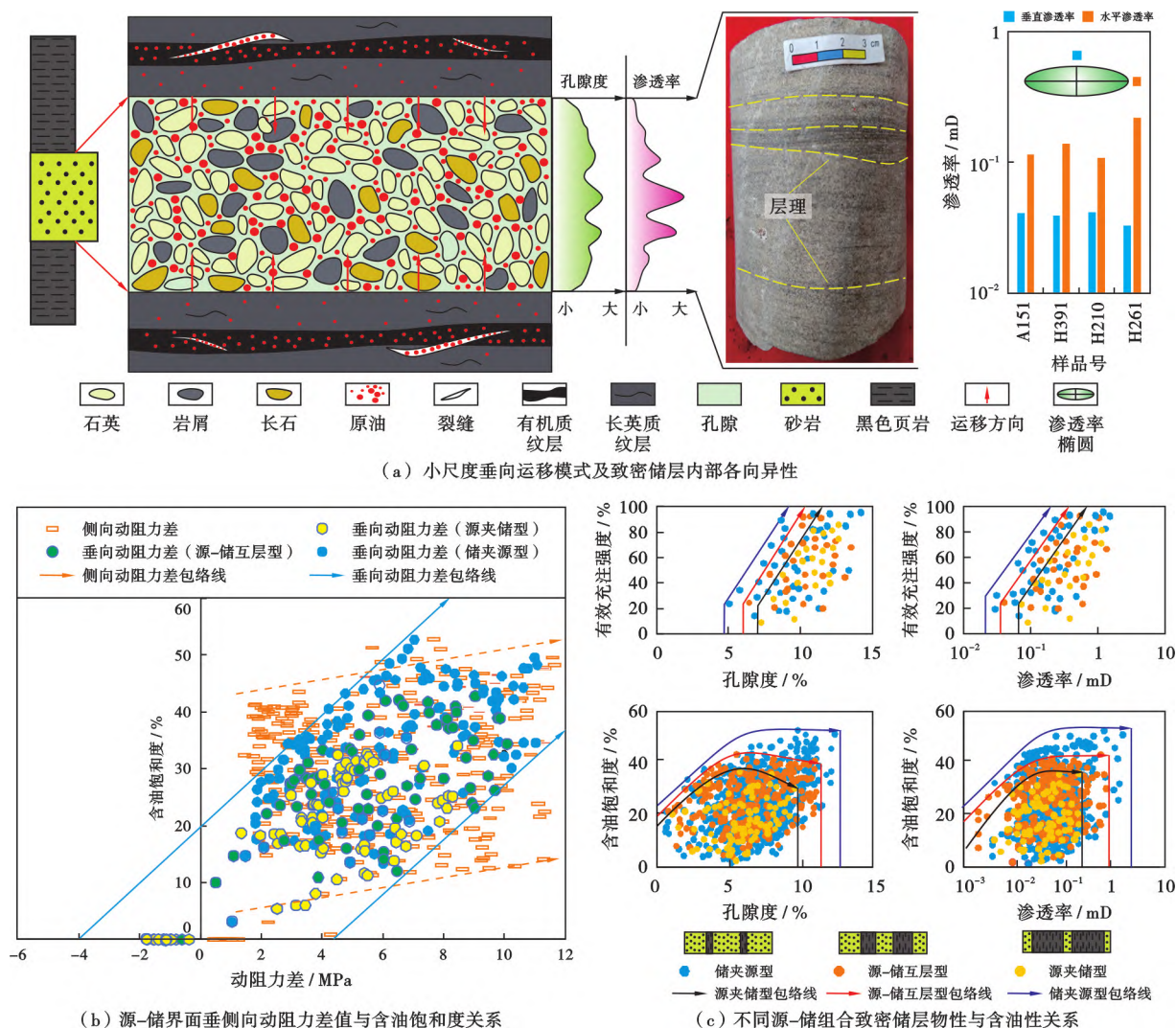


图3 姬塬地区长7段致密储层内原油的小尺度垂向运移模式、致密储层各向异性及不同源-储组合类型的含油性差异

Fig. 3 Small-scale vertical oil migration mode, reservoir anisotropy, and different petroliferous properties of various source-reservoir assemblages in the tight reservoir of Member 7 of Yanchang Formation, Jiuyan area

率数据较为有限,利用实测垂向渗透率与侧向渗透率比值的平均值作为参考,实现基于侧向渗透率数据的垂向渗透率的估算,从而计算获得更多的垂向排驱压力数据,用于评价致密砂岩储层的垂向运移阻力。

通过动阻力差与岩心含油饱和度测试结果的对应关系[图3(b)]可以发现,致密储层的含油饱和度整体上随着动阻力差的增加而增大,但只有动阻力差大于一定临界值时才可能发生致密油充注,这与人通过物理模拟实验获得的认识相一致^[58]。虽然源岩的生烃增压与储层侧向阻力的差值普遍大于2 MPa,但实测含油饱和度随该差值的增加却变化较小。相比之下,生烃增压与储层垂向阻力的差值则在正、负区间均有分布,且动阻力差与实测含油饱和度的正相关性更好,表明原油的充注效率随着垂向动阻力差的增大而显著增大。由此可见,源-储界面上的垂向动阻力差决

定了原油在致密储层内能否发生小尺度垂向运移,同时也影响着原油的充注效率。

在供烃充足或源-储动阻力差相近的条件下,致密储层内的原油富集程度将受到储层厚度及物性特征影响。为了细致刻画“三明治型”致密储层内部的非均质性,笔者结合岩心观察和测井解释结果,以砂地比为40%和60%作为临界值^[3,20],进一步将小尺度运移范围内的源-储组合划分为源夹储型、源-储互层型和储夹源型3种不同类型。通过对比不同类型源-储组合致密储层物性与含油性的对应关系可以发现:储夹源型储层由于厚度大且物性最好,其动阻力差普遍较大[图3(b)],故其有效充注强度(其值为含油砂岩厚度与累计砂岩厚度之比)和含油饱和度均较高[图3(c)];相反,源夹储型致密储层由于厚度小且物性较差,致使其动阻力差整体较小,有效充注强度和含油饱和度均

较低。此外,在相同的动阻力差区间,物性更好的储夹源型致密储层具有更高的最大含油饱和度[图 3(b)],而物性最差的源夹储型致密储层的最大含油饱和度最低(表 1)。储夹源型储层因其岩石粒度更大而具有更低的应力敏感性,物性普遍更好且启动压力梯度更低,从而使得最大含油饱和度更高^[31,58-59];相反,源夹储型致密储层的岩石粒度普遍更小,应力敏感性较高,这使得其物性相对更差且启动压力梯度更高,并由此造成最大含油饱和度偏小。

由此可见,对于运移距离较短的小尺度垂向运移而言,垂向动阻力差决定了充注效率,而源-储组合类型及其储层质量也是影响致密储层原油富集程度的重要因素。

3.2 中尺度垂向充注、运聚机制

基于烃源岩生烃增压和储层排驱压力评价,对中尺度垂向运移的充注动力条件进行了分析。由于此类运移范围内的主要烃源岩与储层在垂向上可通过裂缝网络沟通[图 4(a)],故此处的垂向源-储动阻力差具体

表 1 不同运移尺度的致密储层物性及含油性特征

Table 1 Physical properties and petroliferous properties of tight reservoirs within different migration scales

石油运移尺度类型	储层类型/运移范围	孔隙度/%	渗透率/mD	含油饱和度/%	有效充注强度/%
小尺度垂向运移	源夹储型	0.59~9.59/5.75	0.001~0.330/0.060	2.39~36.64/18.30	9.09~85.71/54.42
	源-储互层型	0.79~11.07/6.30	0.001~0.820/0.100	3.99~43.39/25.80	20.00~91.87/52.80
	储夹源型	0.59~12.69/6.93	0.004~1.510/0.150	1.47~52.66/28.40	12.50~92.31/50.46
中尺度垂向运移	长 7 段 2 亚段内部	0.59~12.26/6.09	0.004~1.430/0.092	1.47~39.87/23.10	5.97~50.00/41.80
	长 7 段 1 亚段内部	0.83~13.36/6.59	0.008~1.490/0.120	3.08~36.03/20.90	7.27~43.75/34.60
大尺度侧向运移	1~10 km	4.71~10.41/7.86	0.003~0.160/0.170	2.39~38.59/22.70	23.53~82.35/48.50
	10~20 km	3.44~13.88/8.33	0.004~0.255/0.120	7.27~37.15/19.60	18.18~81.34/40.50
	20~30 km	4.32~13.09/9.26	0.005~2.380/0.380	3.99~34.24/18.70	12.74~71.34/39.70

注:“/”后为平均值。

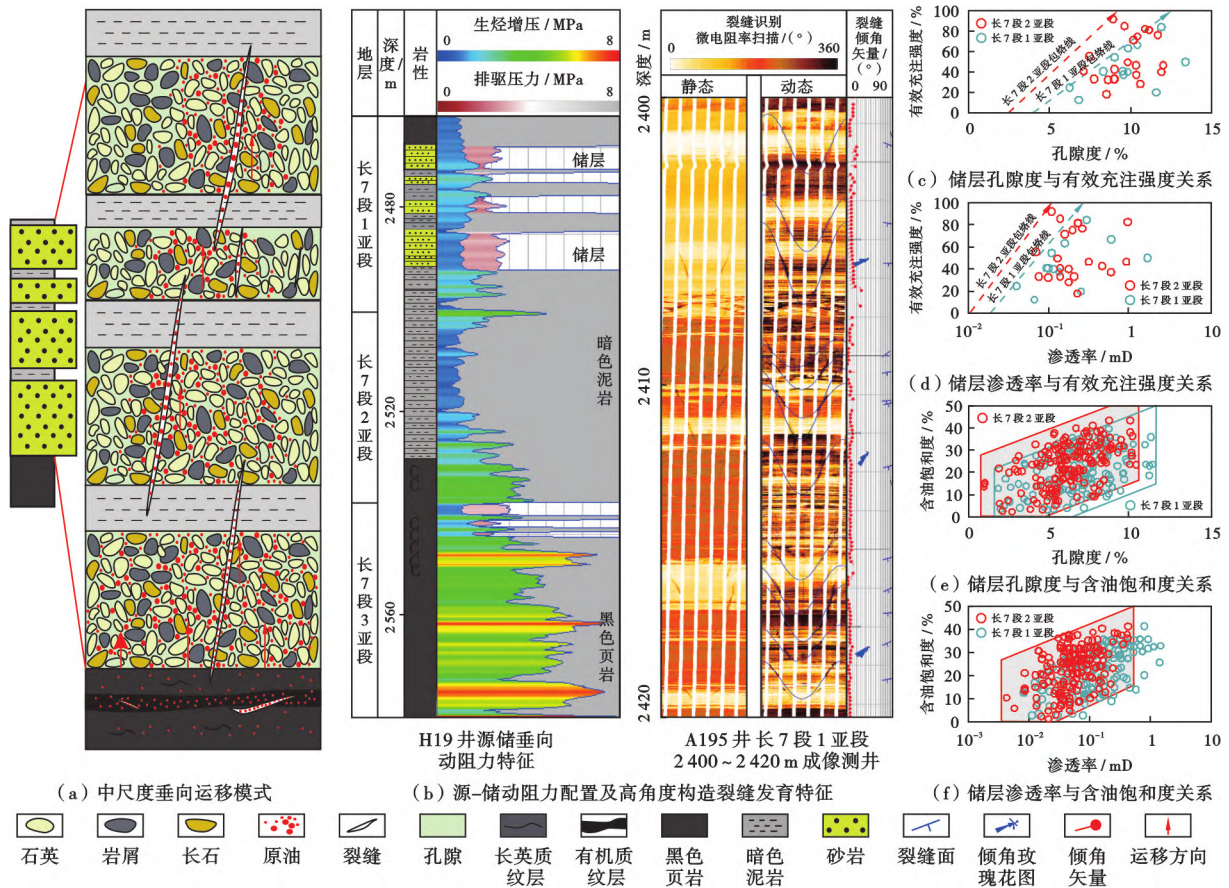


图 4 姬塬地区长 7 段致密储层内原油中尺度垂向运移模式、地质条件及含油性差异

Fig. 4 Medium-scale vertical migration mode, geological conditions and different petroliferous properties of the tight reservoir of Member 7 of Yanchang Formation in Jiyuan area

涵盖3方面内容:①顶部和底部烃源岩生烃增压的差异;②顶部烃源岩生烃增压与相邻储层排驱压力之间的差异;③底部烃源岩生烃增压与顶部储层排驱压力之间的差异。具体而言,鄂尔多斯盆地长7段3亚段黑色页岩的有机地球化学特征明显优于长7段1亚段+长7段2亚段暗色泥岩^[3,31],这导致下部页岩的生烃增压(4.0~7.3 MPa)明显高于上部泥岩的生烃增压(1.8~2.2 MPa)[图4(b)],两者之间存在明显的压力差。此外,由于长7段1亚段+长7段2亚段暗色泥岩的生烃增压较为有限,普遍小于相邻致密储层的垂向排驱压力(2.5~3.0 MPa),这使得其自身难以发生原油充注。由于长7段3亚段黑色页岩的生烃增压普遍大于长7段1亚段+长7段2亚段致密储层的排驱压力,当存在垂向优势渗流通道时,垂向源-储阻力差可为中尺度的垂向运移提供良好的充注动力条件。

原油垂向中尺度运移的发生需要突破不同砂岩储层之间泥页岩隔层的封盖作用,其中,生烃贡献较小的薄层泥页岩往往构成了致密储层石油垂向运移的遮挡条件^[60]。姬塬地区长7段1亚段+长7段2亚段致密砂岩储层之间的隔层主要为泥岩。由于鄂尔多斯盆地长7段厚层砂岩中普遍发育高角度构造缝,这些裂缝能够切穿砂岩顶、底部的泥岩隔层,因而穿层裂缝是垂向沟通不同砂岩层的潜在渗流通道^[3,31]。研究区的构造缝主要形成于燕山期构造运动主幕^[38-40],与早白垩世的致密油充注期一致^[46-47],原油在源-储阻力差的驱动下可沿开启的裂缝网络发生垂向运移。尽管原油在沿构造裂缝垂向运移过程中也可能受到浮力作用,但由于构造缝的倾角较大,浮力作用的差异较小。如图4(b)所示,长7段1亚段+长7段2亚段致密砂岩储层中发育数量较多的高角度构造缝,其与不同砂岩层在垂向上相互连通,构成了垂向输导网络,并使得长7段3亚段生成的原油可垂向运移至上部长7段1亚段+长7段2亚段储层中。因此,高角度构造缝网是垂向中尺度运移的优势输导通道。

结合致密储层含油性,笔者对原油在不同运移距离和储层质量下的富集程度进行了探讨。与小尺度垂向运移不同,中尺度垂向运移的原油主要来自于底部长7段3亚段的黑色页岩,而长7段2亚段和长7段1亚段内与致密储层相邻的暗色泥岩并不是主要的烃源岩。因此,此时的致密储层不再按照源夹储型、源-储互层型和储夹源型进行分类,更多地是考虑距离长7段3亚段烃源岩的远近,将其划分为长7段2亚段内部和长7段1亚段内部致密储层2类。其中,长7段1亚段内部致密储层距离长7段3亚段主要烃源岩的垂向距离较远,通过裂缝网络发生垂向充注运聚的难度相对更大。如

图4(c)所示,在中尺度垂向运移范围内,运移距离较远的长7段1亚段储层,其含油性明显弱于长7段2亚段。由此可见,在垂向运移过程中,由于充注动力不断衰减和原油在致密储层中不断滞留或聚集,原油的富集程度往往随着运移距离的增加而降低。此外,当原油沿裂缝进入砂岩储层时,由于阻力的差异会优先沿着物性更好的砂体发生分流,从而导致在物性更好的砂岩中其原油的有效充注强度和含油饱和度均更高[图4(c)]。在相同物性区间,长7段2亚段的充注条件要好于长7段1亚段,由此导致前者的最大充注强度和含油饱和度均大于后者。分析表明,当油气在垂向上发生中尺度运移时,致密储层的原油富集程度主要受运移距离和储层质量控制。

3.3 大尺度侧向充注、运聚机制

油气的大尺度运移多表现为盆地中心黑色页岩生成的原油沿几何连通的砂体向斜坡带致密储层中发生侧向充注[图5(a)],以新安边地区三角洲沉积体系最为典型。就动力和阻力条件而言,新安边地区长7段主要发育供烃能力较差的暗色泥岩,其生烃增压(0.5~1.8 MPa)普遍小于源-储界面上的垂向排驱压力(2.0~2.6 MPa),较难发生自身原油的垂向充注;相比之下,盆地中心黑色页岩的生烃增压(3.0~9.0 MPa)则大于新安边地区的暗色泥岩。此外,受储层结构的各向异性影响,黑色页岩与致密储层之间的侧向动阻力差(2.2~8.2 MPa)要明显大于斜坡带暗色泥岩与致密储层之间的垂向动阻力差(多为负值)。因此,当黑色页岩与连通砂体呈侧向接触时,其侧向充注效率往往高于垂向充注,这也是致密储层内原油侧向运移距离普遍较垂向运移距离大的原因之一。对于垂向裂缝较为发育的情况,也不排除油气在垂向上可能比侧向更容易运移。但整体而言,侧向高动阻力差为油气的大尺度侧向高效充注和长距离运移提供了动力基础。

原油的大尺度侧向运移需要以空间上几何连通的砂体作为输导通道。笔者采用罗晓容等^[61]基于砂岩含量的高斯拟合数学模型对致密砂岩储层的侧向几何连通概率进行了定量评价,揭示了不同砂体连通下油气显示的差异。如图5(a)所示,对于与优质烃源岩(黑色页岩)相接触的致密储层而言,砂体的侧向连通性越好,其油气富集程度整体越高。对于仅与暗色泥岩呈侧向接触的连通砂体,由于暗色泥岩的供烃能力有限,尽管砂岩的连通性较好,但有效充注强度普遍较小。对于暗色泥岩中的孤立砂体,由于邻近烃源岩的供烃不足且缺乏由连通砂体提供的侧向原油充注,从而使得其致密储层内的原油富集程度整体较低。统计结果表明,致密储层的连通概率与有效充注强度之间

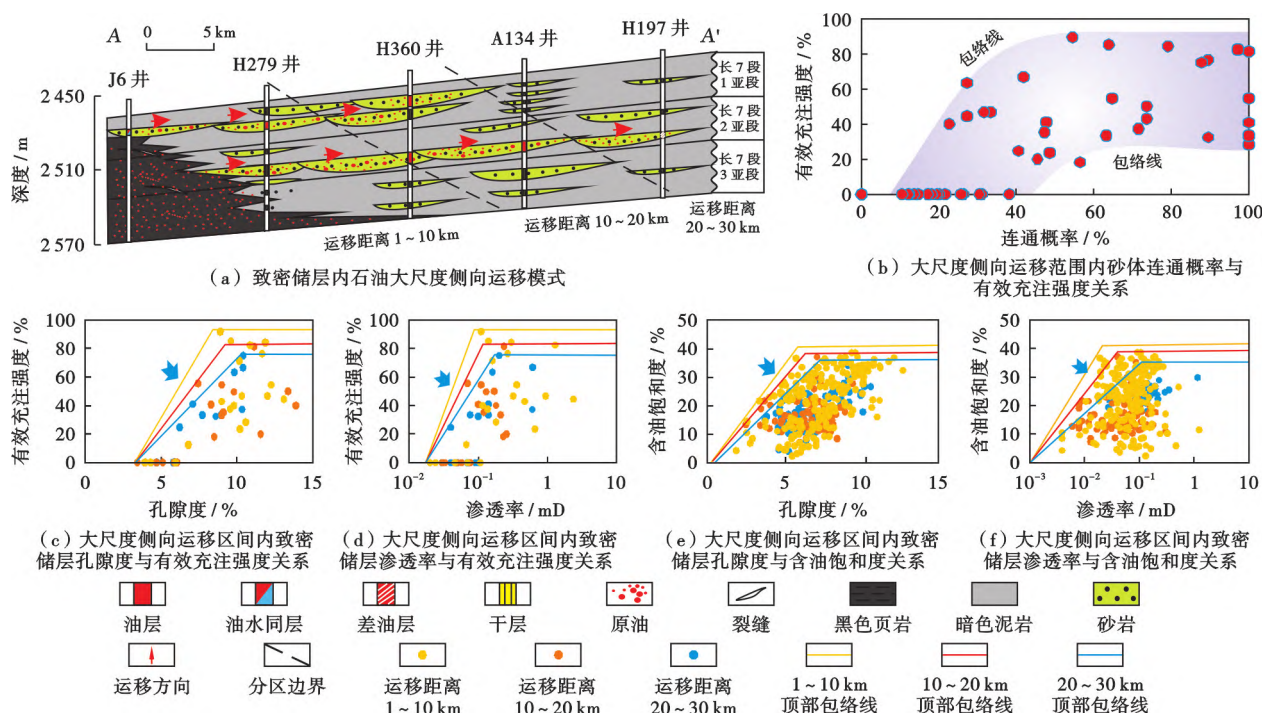


图5 姬塬地区长7段致密储层内原油大尺度侧向运移模式及不同运移区间含油差异(剖面位置见图1)

Fig. 5 Large-scale lateral migration mode of crude oil and different petroliferous properties in various migration intervals in the tight reservoir of Member 7 of Yanchang Formation in Jiuyuan area

存在一定的正相关关系,其中,连通概率小于20%的致密储层其有效充注强度较低,而连通概率大于40%的致密储层其有效充注强度明显更高[图5(b)]。由此证实,几何连通砂体是大尺度侧向运移的优势输导通道。

为了探讨储层质量对原油富集程度的影响,笔者对大尺度侧向运移范围内的储层含油性进行了统计。分析结果表明,储层物性越好,其油层的占比越高,对应的最大有效充注强度和含油饱和度往往也越高[图5(c)—图5(f)]。为了揭示不同运移距离下储层含油性的差异,笔者考虑实际的侧向运移范围,将研究区大尺度侧向运移划分为1~10 km、10~20 km和20~30 km共3个距离区间。在相同物性区间,不同运移距离区间内的最大充注强度和最大含油饱和度整体上随运移距离的增加而有所降低,暗示了充注动力条件的衰减。综上所述,大尺度侧向运移范围内的原油富集程度同样主要受运移距离与储层质量控制。

4 致密储层中石油多尺度运移的成藏效应

多尺度运移过程会对致密储层中的原油赋存特征、含油性、可动性以及产能大小产生影响。笔者通过原油族组分分析以及激光共聚焦、核磁共振、岩石热解等分析结果,对鄂尔多斯盆地姬塬地区长7段在多尺度

运移作用下的原油成藏效应进行了系统梳理,研究结果可为致密储层的地质甜点评价及优选提供新思路。

4.1 多尺度运移对致密储层内原油赋存特征的影响

根据9口钻井13件典型样品的原油族组分分析测试结果[取样井位置见图6(a)],笔者对不同尺度运移范围内的原油族组分变化进行了探讨。分析结果表明:在小尺度垂向运移范围内,原油中的饱和烃含量为16.22%~52.97%、平均为34.30%,芳香烃含量为17.46%~42.92%、平均为29.62%[图6(b)];在中尺度垂向运移范围内,原油中的饱和烃平均含量增大至64.96%,芳香烃、非烃和沥青质含量均明显降低;对于大尺度侧向运移范围,原油中的饱和烃平均含量达到72.38%,而芳香烃、非烃和沥青质的平均含量分别为14.75%、7.76%和1.08%。由此可见,受地质色层效应控制,多尺度运移过程将导致储层中的原油族组分发生分异。其中,原油中的饱和烃含量将随运移尺度的增大而逐渐增大,而芳香烃、非烃和沥青质含量则逐渐降低[图6(c)]。

笔者利用激光共聚焦荧光三维可视化技术^[62-63],选取典型样品对致密储层微米级孔隙中赋存原油的轻、重组分进行了定性和定量分析。图7所示:在石英、长石和方解石等透明矿物区域,轻质组分含量相对较多,以游离态为主;而在泥质发育的不透明区域,重质组分含量普遍更多,以吸附态为主。整体而言,对于

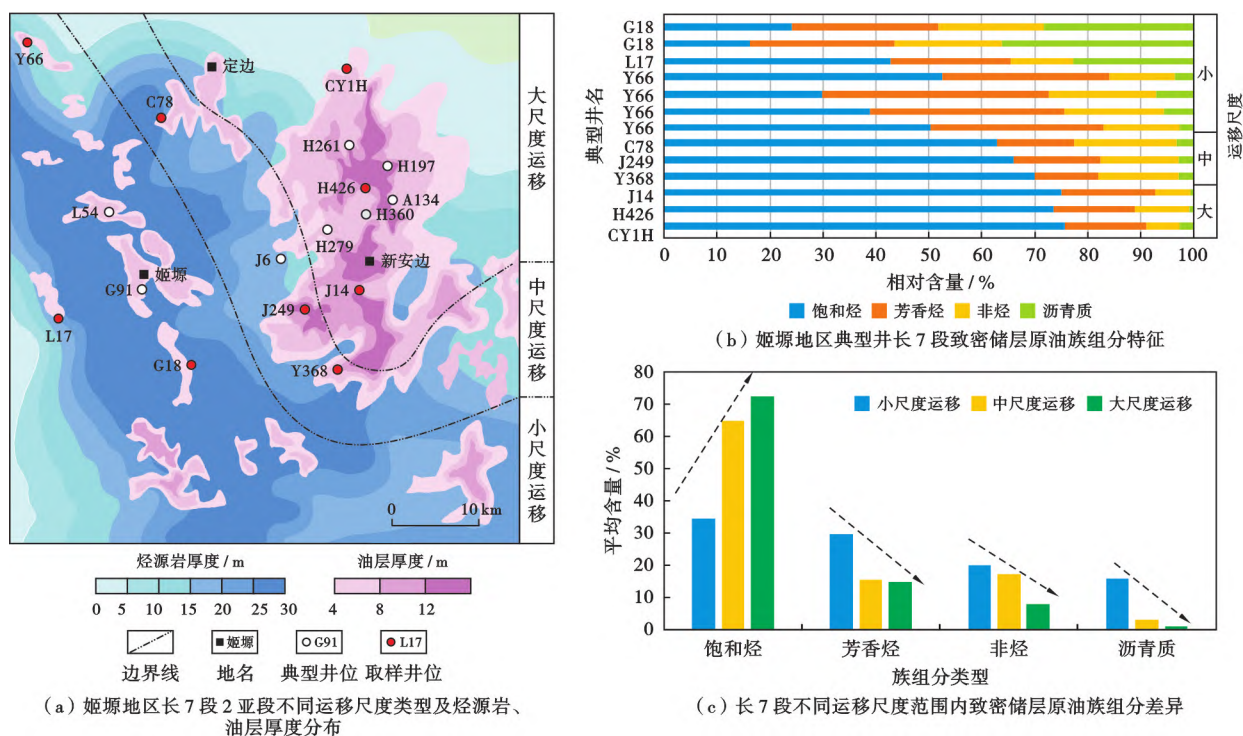


图6 姬塬地区长7段2亚段不同运移尺度的分布范围、典型井位及其原油族组分特征

Fig. 6 Distribution of different migration scales, typical well locations and oil composition characteristics of the second submember of Member 7 of Yanchang Formation in Jiyuan area

发生小尺度垂向运移的原油,因其未经历明显的地质分异作用,存在重质组分滞留且含量明显高于轻质组分的特征,典型样品中的轻、重组分之比仅为0.659,且在激光共聚焦显微镜下可见重质组分相对多于轻质组分[图7(a)]。相比之下,在中尺度垂向运移条件下,原油经历了几十米至数百米的地质分异过程,这使得流动性更强的轻质组分含量在储层中有所增多,典型样品中的轻、重组分之比为0.705,在激光共聚焦显微镜下可见轻质组分呈连续分布[图7(c)]。同理,由于原油在大尺度侧向运移中的运移距离最大,轻、重组分的分异作用更为明显,储层中轻质组分含量明显高于重质组分,典型样品的轻、重组分之比为1.002,在激光共聚焦显微镜下可见轻质组分明显多于重质组分[图7(e)]。由此得出,多尺度运移过程将导致原油中的轻、重组分之比发生变化,其中,轻质组分的相对含量随运移距离的增加而逐渐增大。

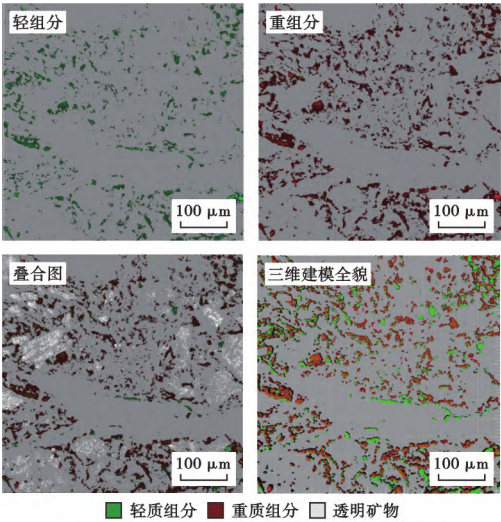
对于原油所赋存孔隙的孔径范围而言,由于原油轻质组分的流动性要好于重质组分,因此,姬塬地区致密储层内整体上具有中—轻质组分在小孔径中占比更高,而中—重质组分在大孔径中占比更高的特点(图7)。尽管如此,在不同运移尺度内,原油轻、重组分所赋存孔隙的孔径分布范围仍存在一定差异。对于运移距离最短的小尺度运移而言,由于储层邻近烃源岩而具备连续供烃条件,充足的动力条件会使得轻质组分优先进入

到较小的孔隙中,其最小赋存孔径为 $1.35\mu\text{m}$,且轻、重组分所赋存孔隙的孔径分布呈明显的双峰型[图7(b)]。对于中尺度垂向运移过程,原油的充注动力会随着运移尺度的增大而逐渐衰减,其中,轻质组分所赋存的最小孔径为 $1.40\mu\text{m}$;尽管此时轻、重组分所赋存孔隙的孔径分布仍具有双峰特征,但二者的峰值已逐渐逼近[图7(d)]。同样地,在大尺度侧向运移过程中,致密储层中的原油充注动力也会随着运移尺度的增大而发生更快衰减,这导致轻、重组分所赋存孔隙的孔径分布峰值逐渐重合,最终接近单峰型,其中,轻质组分的最小赋存孔径也增加到 $1.84\mu\text{m}$ [图7(f)]。综上所述,原油运移距离的增加伴随着充注动力衰减,导致轻、重组分的流动分异性减弱^[62],使得储层中轻、重组分所赋存孔隙的孔径范围差异逐渐变小。

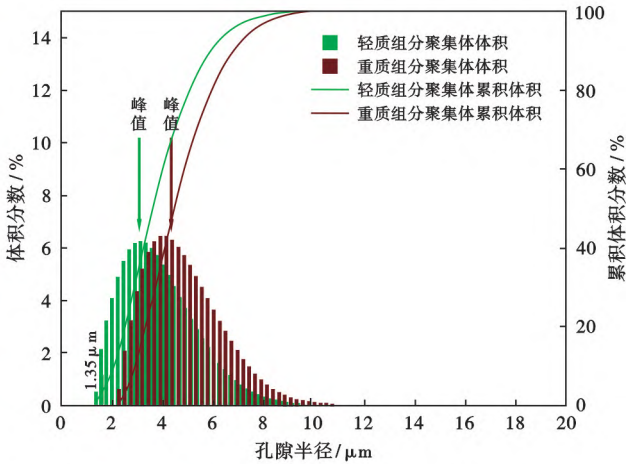
4.2 多尺度运移对致密储层内含油性特征的影响

笔者选取油井占比(油井数与某一运移尺度范围内总井数之比)、含油厚度、有效充注强度(含油砂岩厚度与总砂岩厚度之比)和含油饱和度作为定量指标,对姬塬地区致密储层的含油性进行系统评价,揭示不同运移尺度范围内的含油性特征及差异。

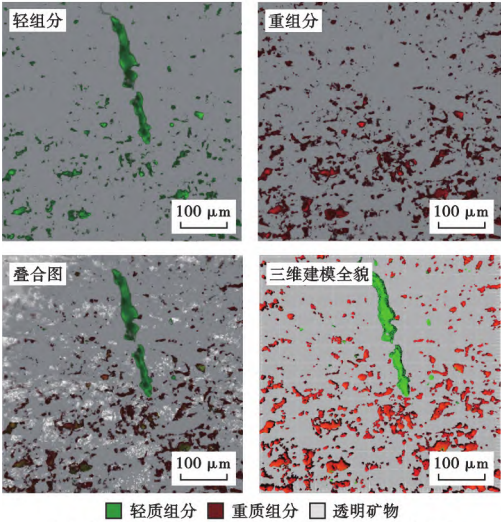
图8所示,小尺度垂向运移范围内的储层含油性首先受控于储层的发育程度,各项参数整体上表现为随着砂体厚度(或运移距离)的增大而增强,其中,以储夹源型储层的含油性较好而源夹储型储层的含油性较



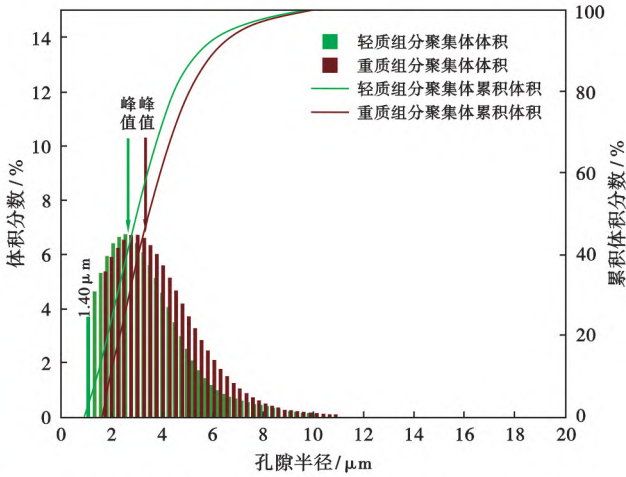
■ 轻质组分 ■ 重质组分 □ 透明矿物
(a) 小尺度垂向运移范围内致密砂岩激光共聚焦原油组分特征,长 7 段 2 亚段, G91 井 2 710.10 m



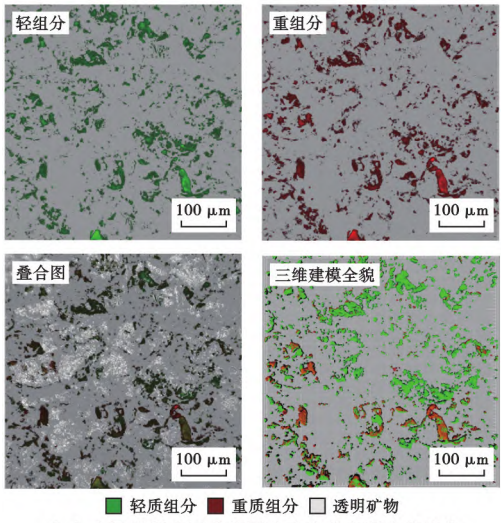
(b) 小尺度垂向运移范围内致密砂岩孔隙半径分布及原油轻重组分体积分数,长 7 段 2 亚段, G91 井 2 710.10 m



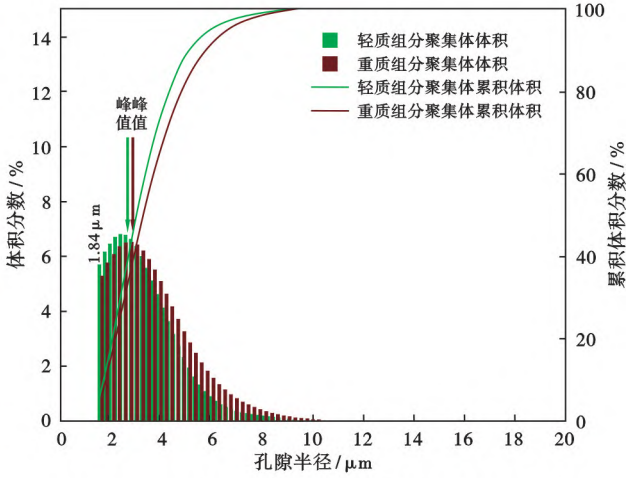
■ 轻质组分 ■ 重质组分 □ 透明矿物
(c) 中尺度垂向运移范围内致密砂岩激光共聚焦原油组分特征,长 7 段 1 亚段, L54 井 2 407.75 m



(d) 中尺度垂向运移范围内致密砂岩孔隙半径分布及原油轻重组分体积分数,长 7 段 1 亚段, L54 井 2 407.75 m



■ 轻质组分 ■ 重质组分 □ 透明矿物
(e) 大尺度侧向运移范围内致密砂岩激光共聚焦原油组分特征,长 7 段 2 亚段, H261 井 2 194.58 m



(f) 大尺度侧向运移范围内致密砂岩孔隙半径分布及原油轻重组分体积分数,长 7 段 2 亚段, H261 井 2 194.58 m

图 7 姬塬地区不同运移尺度范围内致密储层激光共聚焦荧光三维可视化对比

Fig. 7 Three-dimensional visualization comparison of laser confocal fluorescence of tight reservoirs within different migration scales in Jiyuan area

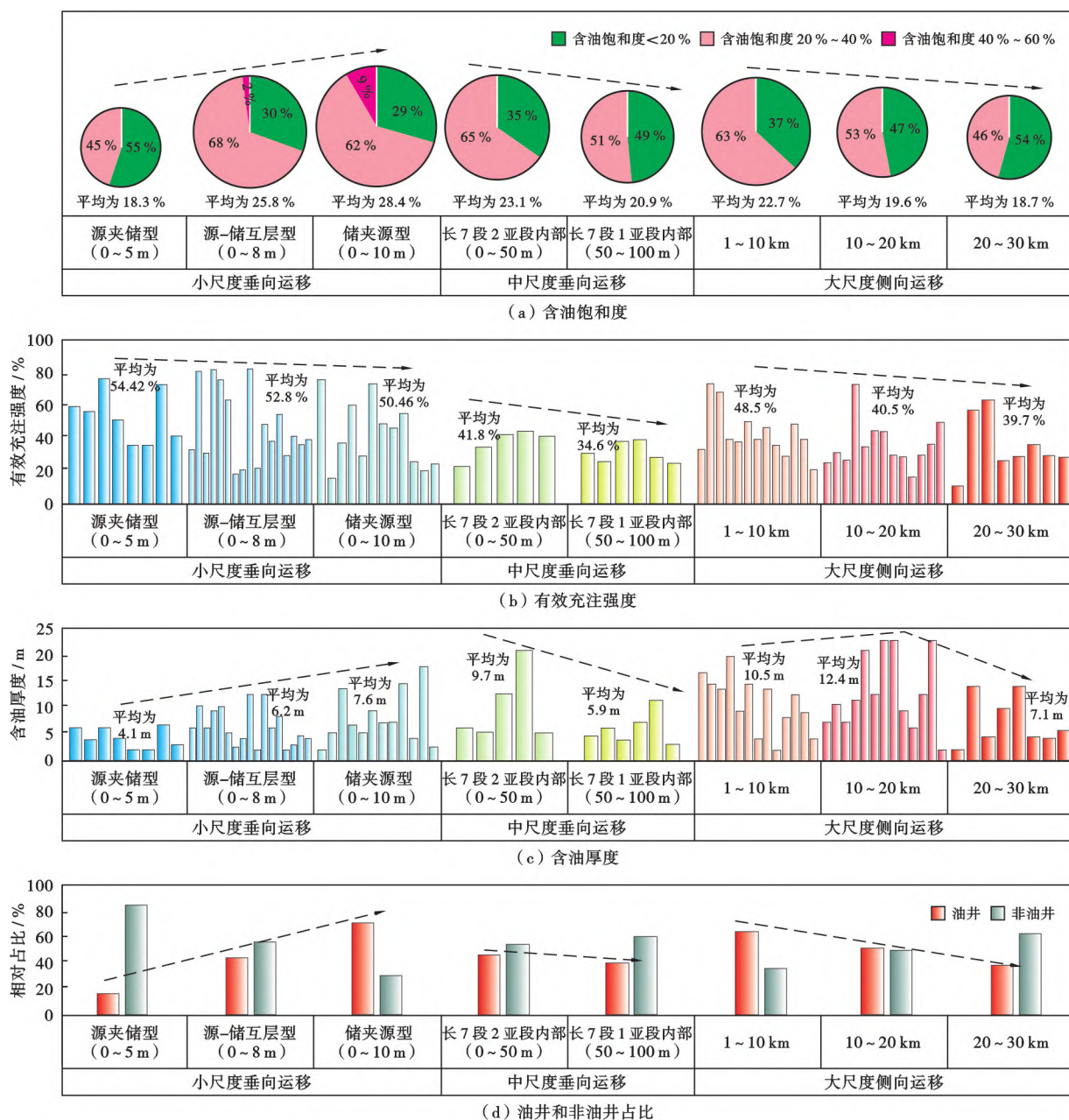


图8 不同运移尺度范围内致密储层的含油性对比

Fig. 8 Petroliferous property correlations of tight reservoirs within different migration scales

差。此外,由于在充注动力相似的条件下含油饱和度的大小受控于储层物性的好坏,因而物性最差的源夹储型储层表现为具有较低的含油饱和度[图3(c)]。相反,在中尺度垂向和大尺度侧向运移中,储层的含油性除了受储层物性影响外,更多地还受到了高角度构造裂缝和侧向连通砂体等输导条件的制约;加之充注动力不断衰减,各项含油性参数均表现出随运移距离的增加而逐渐降低的特征。

对比3种不同运移尺度范围内致密储层的含油性特征可以发现,尽管整体含油厚度偏小,除物性最差的源夹储型致密储层以外,小尺度运移范围内的致密储层由于供烃充足,普遍具有有效充注强度和含油饱和度较高的显

著特点。相反,对于大尺度侧向运移范围内的致密储层,尽管其整体含油厚度较大,但由于充注动力条件变差而呈现出有效充注强度和含油饱和度相对较低的特点。同理,对于中尺度运移范围内的致密储层,其含油性则介于小尺度和大尺度之间。由此可见,不同运移尺度之间以及同一运移尺度内的致密储层,其含油性特征存在明显差异,在实际的成藏分析中并不能完全套用某一运移尺度的含油性规律来预测其他尺度的含油性变化。

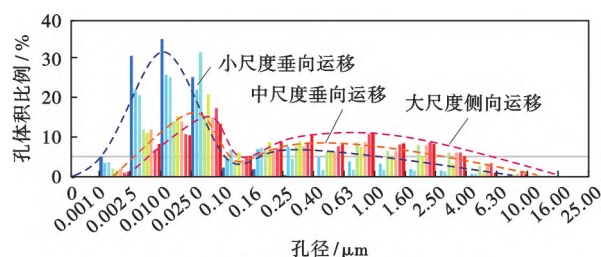
4.3 多尺度运移对致密储层内原油可动性的控制

笔者采用核磁共振实验来表征不同运移尺度范围内39件致密砂岩样品在微米—纳米尺度的孔径分布及可动流体饱和度。其步骤为:首先,将直径为2.5 cm

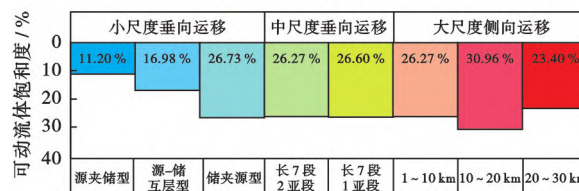
的标准岩心样品进行洗油、洗盐和烘干,得到干样;然后,采用 ZYB-II 型真空加压饱和装置抽真空 12 h,加压 20 MPa,饱和航空煤油,并在样品质量不再发生变化时得到饱油样;最后,在转速为 10 000 r/min 的条件下高速离心 2 h,得到饱油离心样。核磁共振实验采用 SPEC-RC035 型高温高压驱替核磁共振分析与成像系统,其横向弛豫时间(T_2)谱的测量采用 CPMG 序列(Carr-Purcell-Meiboom-Gill Sequence)自旋回波方法,回波间隔时间为 300 μ s,回波个数为 1 024 个,扫描次数为 32 次,等待时间为 3 000 ms。

另一方面,利用 66 件砂岩样品开展储集岩热解分析以获得致密储层原油的不同组分含量,从而定量分析可动油量(或游离油量)的差异。需要注意的是,储油岩(致密砂岩)的岩石热解评价与生油岩有些许不同,储油岩中油气的热解分析实质上是通过不同温度段的热蒸发来测定岩石中原油各馏分的含量。笔者主要采用邬立言等^[64]提出的储油岩油气组分定量分析方法:在 200 $^{\circ}$ C 条件下恒温 1 min 后测试汽油含量(S_{11}');然后,以 50 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 350 $^{\circ}$ C,并恒温 1 min 后测试煤油和柴油含量(S_{21}');再以 50 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 450 $^{\circ}$ C,并恒温 1 min 后测试蜡质和重油含量(S_{22}');最后,再以 50 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 600 $^{\circ}$ C,并恒温 1 min 后测试胶质和沥青质含量(S_{23}')。 S_{11}' 、 S_{21}' 、 S_{22}' 与 S_{23}' 之和可表征致密砂岩储层中的总油量,而 S_{11}' 与 S_{21}' 之和则可表征致密储层内的可动油量(或游离油量)^[65]。

不同运移尺度范围内的可动流体饱和度受到致密储层的孔隙结构制约。研究区的小尺度垂向运移主要发生在西部重力流致密储层内,该类储层孔径较小,介孔(孔径为 0.002~0.050 μ m)分布的频率较高[图 9(a)],可动流体饱和度相对较小,以质量较好的储夹源型储层为最优[图 9(b)]。相较之下,中尺度垂向运移和大尺度侧向运移主要发育在东部新安边地区的三角洲沉积储层内,该类储层的孔径相对较大,宏孔(孔径 > 0.05 μ m)的分布频率更高,导致可动流体饱和度整体比小尺度运移高。储集岩的热解分析结果(图 10)表



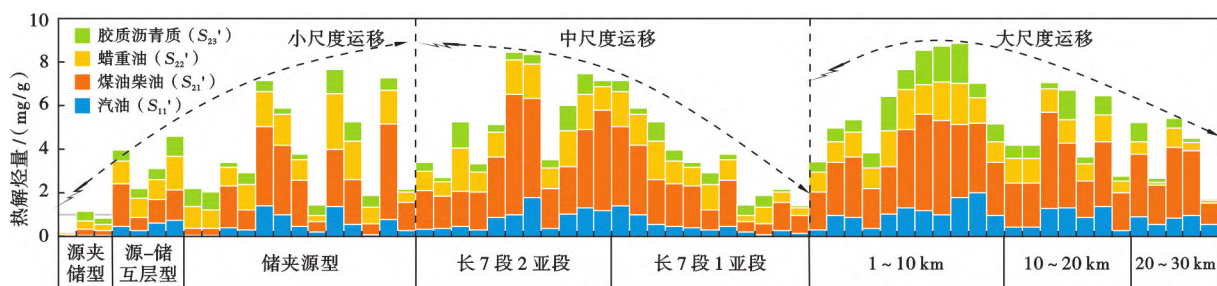
(a) 不同运移尺度内致密储层孔径分布



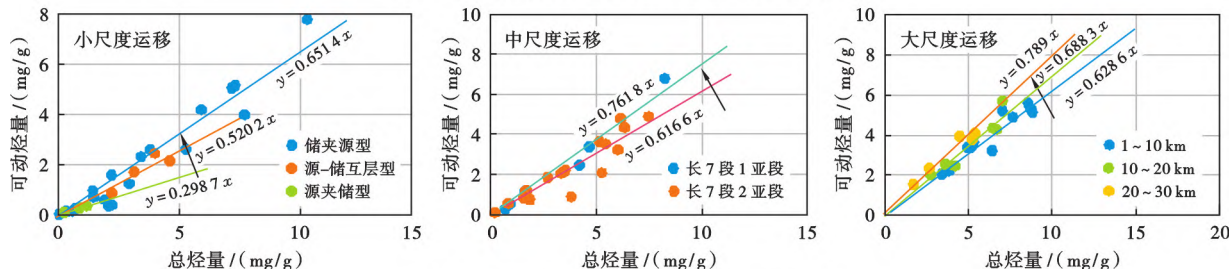
(b) 不同运移尺度内致密储层可动流体饱和度分布

图 9 不同运移尺度内致密储层孔径分布及可动流体饱和度

Fig. 9 Pore size distribution and mobile fluid saturation of tight reservoirs within different migration scales



(a) 不同运移尺度范围内致密储层原油不同组分含量特征



(b) 不同运移尺度范围内致密储层可动油量特征

图 10 不同运移尺度内致密储层热解烃量、总烃量及可动烃量特征

Fig. 10 Pyrolytic hydrocarbon quantity, total hydrocarbon quantity and mobile hydrocarbon quantity of tight reservoirs within different migration scales

明,小尺度运移范围内不同源-储组合致密储层的总烃量存在较大差异,其中,以砂体厚度最大的储夹源型储层的总烃量最多,而砂体厚度最小的源夹储型储层的总烃量最少[图 10(a)]。对于可动烃量而言,储夹源型储层的可动烃量最高,其次为源-储互层型储层,源夹储型储层的可动烃量最低,整体差异较大[图 10(b)]。此外,可动烃量与总烃量线性回归的斜率可反映出整体的可动油占比(可动烃量与总烃量之比)特征。对于小尺度垂向运移,该斜率从源夹储型储层的 0.30 变化至储夹源型储层的 0.65,暗示可动油占比明显增加;对于中尺度垂向运移和大尺度侧向运移而言,随着运移距离的增加,致密储层内的总烃量逐渐降低,可动烃量与总烃量线性回归的斜率则逐渐变大,暗示可动油相对占比增大。中一大尺度运移时可动油占比的变化范围明显小于小尺度运移,可动油占比主要在 0.61 和 0.79 之间变化。这可能是由于原油在大距离运移后轻质组分普遍较高,从而使得可动油占比的变化逐渐趋于平缓。综上所述,不同运移尺度范围内的储层孔隙结构和运移距离共同控制着致密储层内原油可动性的变化。

4.4 多尺度运移对致密储层产能大小的控制

致密储层产能的大小是多个地质因素共同作用的结果。笔者根据研究区 51 口井的产能数据,对不同运移尺度下的单井产能变化规律进行了分析。结果表明,小尺度运移范围内致密储层的产能变化与中一大尺度有所不同,前者主要是由于源-储组合(或储层厚度)的不同而发生变化[图 11(a)],后者则表现为随着运移距离的增加而逐渐衰减。通过对不同运移尺度范围内的原油充注运聚条件、原油组分、含油性、可动性特征进行打分排序,可以发现致密储层的产能大小与上述各类评价参数之间存在着良好的对应关系[图 11(b)],即产能越高的区域在各项地质参数上的得分也越高,反之亦然。由此可见,3 类致密储层的原油高产能区(大尺度运移的 1~10 km 区间、中尺度运移的长 7 段 2 亚段内部、小尺度运移的储夹源型储层)在各类地质特征上的得分均较高,是致密储层地质甜点评价中的潜在有利区。相反,小尺度运移的源夹储型、中尺度运移的长 7 段 1 亚段内部、大尺度运移的 20~30 km 区间在各类地质条件上的得分普遍较低,是未来油气勘探开发中值得关注的潜在风险区。

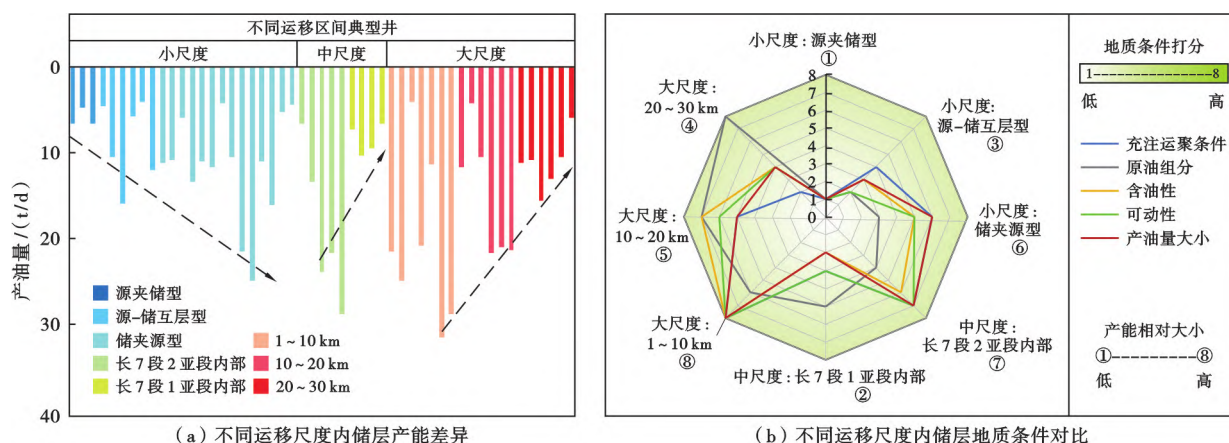


图 11 不同运移尺度内储层产能差异及地质特征对比

Fig. 11 Differential productivity of tight reservoirs within different migration scales and comparison of corresponding geological features

5 致密储层石油多尺度运聚富集模式

基于上述剖析,总结出研究区长 7 段致密储层内原油多尺度差异运聚富集模式(图 12):

厘米—米级的小尺度垂向运移多发生在盆地中心的重力流沉积体系内,在源-储配置上具有典型的源-储互层或“三明治”结构特征,表现为源岩生成的原油垂向充注到相邻致密储层中。此类油气运移能否发生主要取决于源-储界面的垂向动阻力差异,动阻力差越大,原油充注运移的效率越高。此外,由于运移距离较短,小尺度运移范围内的原油族组分和轻重组分含量

分异较小,但所赋存的孔径范围差异较大。由于供烃充足,原油富集程度整体受到源-储组合及储层质量控制,最终展现出储夹源型储层的含油性、可动性和产能较好以及源夹储型储层的含油性、可动性和产能较差的特征。

十米—百米级的中尺度垂向运移多发生在下部长 7 段 3 亚段烃源岩质量较好而上部长 7 段 1 亚段 + 长 7 段 2 亚段烃源岩质量差的部位,在源-储配置上表现为下生上储,原油在垂向源-储动阻力差的驱动下主要通过裂缝网络垂向输导。因运移距离的增加和充注动力的衰减,此类运移范围内的原油饱和烃含量与轻重

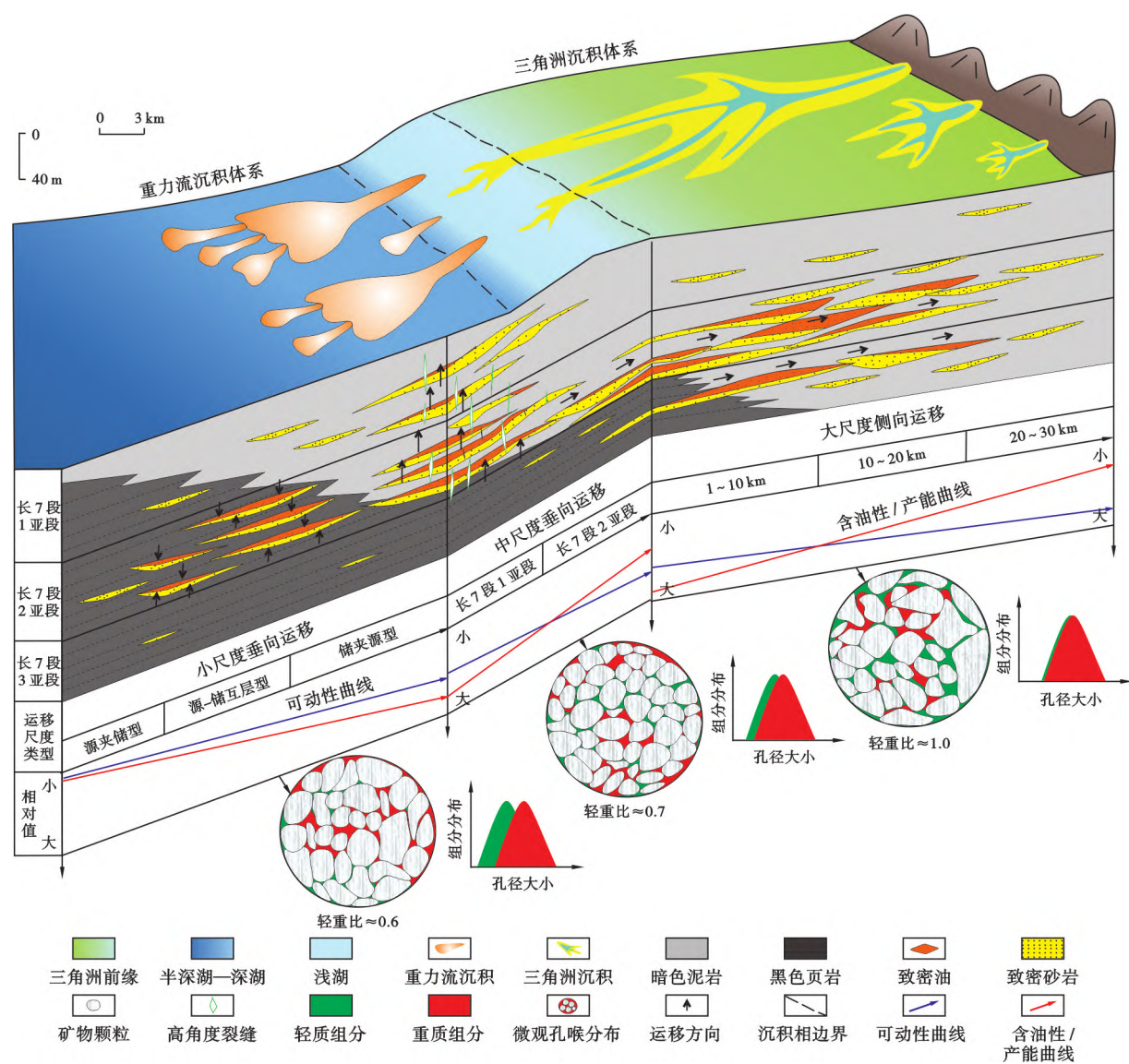


图 12 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 7 段致密储层石油多尺度运移及差异富集模式

Fig. 12 Multi-scale migration and differential enrichment mode of tight oil reservoir in the Member 7 of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin

比逐渐增大,轻重组分赋存的孔径范围逐渐接近。与此同时,此类运移范围内的原油富集程度因储层质量和运移距离差异而存在较大不同,整体的含油性随运移距离的增大而降低,可动性则略微变好,最终使得长 7 段 2 亚段内部致密储层的产能普遍高于长 7 段 1 亚段。

千米级的大尺度侧向运移多发生在斜坡带自身烃源岩供烃能力有限的区域,源-储配置呈现出下生(或旁生)侧储,表现为盆地中心生成的原油在侧向高动阻力差的驱动下通过几何连通砂体高效侧向输导。此类运移范围内的原油分异明显,运移距离的增加导致饱和烃含量与轻重比均逐渐增大,轻重组分赋存的孔径范围逐渐重合,储层含油性逐渐降低而可动油占比逐渐增高,原油富集程度整体受运移距离与储层质量制约,最终表

现出运移区间为 1~10 km 的储层产能依次高于运移区间为 10~20 km 和 20~30 km 的储层产能。

对于平面石油富集规律而言,由于厘米—米级小尺度垂向运移发生的区域砂体连通性较差,该类型的石油聚集整体呈现出离散分布的特征,平面上重力流砂体较为发育的区域往往是石油大规模富集的有利区。十米—百米级的中尺度垂向运移发生的区域多处在重力流和三角洲沉积体系过渡区,其中,长 7 段 2 亚段和长 7 段 1 亚段中存在多套砂体纵向叠置的平面区域更易形成连通的裂缝网络,是该类型石油富集的有利区。针对千米级大尺度侧向运移的斜坡带,石油主要富集在横向连片分布的致密砂岩储层内,寻找与盆地中心优质烃源岩相接触的侧向连通三角洲砂体是该

类型石油勘探的关键。

致密储层石油的多尺度运聚模式揭示了石油在盆地不同部位、不同沉积体系及不同尺度致密储层中的运移过程及聚集特征,其中,不同运移尺度下的含油性、可动性及产能变化规律可为致密储层的甜点评价和优选提供参考,对鄂尔多斯盆地长7段的石油勘探实践具有重要指导意义。此外,笔者建立的小—中—大尺度油气运移模式及分析的相关富集规律对评价其他含油气盆地在相似地质背景下的致密储层甜点和开展钻井设计也具有一定参考价值。

6 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地姬塬地区长7段致密砂岩储层因其源-储配置及输导条件差异而呈现出石油沿水平或垂直方向多尺度运移。主要包括:源-储直接接触下的厘米—米级小尺度垂向运移;通过高角度构造裂缝沟通的十米—百米级中尺度垂向运移;以及依靠几何连通砂体侧向输导的千米级大尺度侧向运移。

(2) 小尺度垂向运移的发生取决于源-储界面垂向动阻力差异,通常动阻力差越大,油气充注效率越高。此类运移范围内的原油饱和烃含量和轻重比均较低,轻重组分赋存的孔径范围差异较大。此外,致密储层中的原油富集程度将受源-储组合及储层质量控制,其含油性及可动性均随砂体厚度(或运移距离)的增大而增大,以储夹源型致密储层的产能较好。

(3) 油气的中尺度垂向运移和大尺度侧向运移在源-储压差的驱动下分别沿高角度构造裂缝和侧向连通砂体进行,运移范围内的致密储层的原油富集程度均受到运移距离与储层质量所制约。随着运移距离增加,原油饱和烃含量与轻重比逐渐增大,轻重组分赋存的孔径范围逐渐重合,储层含油性逐渐降低而可动油占比逐渐增高,好的产能出现在中尺度垂向运移的长7段2亚段内部和大尺度侧向运移的1~10 km区间。

(4) 研究区油气发生大尺度运移的1~10 km区间、中尺度运移的长7段2亚段内部以及小尺度运移的储夹源型致密储层是未来长7段石油勘探开发的3类有利目标区。研究揭示,油气的多尺度运移聚集机制及成藏效应可以加深致密储层内原油差异富集主控因素的理论认识,也可对其他盆地致密储层的精细甜点评价提供参考。在实际勘探开发过程中,可以依托源-储空间配置的精细刻画来划分不同运移尺度类型,随后,通过对比原油的充注运聚机制及成藏效应差异来确定优势运移类型及区间,从而实现致密储层石油富集有利区的排序和优选,为后期开发评价及产能建设井位部署提供支撑。

符号注释: Δp —生烃增压, MPa; A —氢指数值的1/1000, mg/g; M_k —总有机碳含量; F —干酪根转化率; α —残留烃系数; ρ_k —地下原油密度, kg/m³; D —地下原油密度与地表原油密度的比值; h —深度, m; p_h —地下深度 h 处的静水压力, MPa; C_o —石油压缩系数, MPa⁻¹; C_w —水压缩系数, MPa⁻¹; ϕ_w —地下深度 h 处的地层孔隙度; C_k —干酪根压缩系数, MPa⁻¹; S_{11}' —汽油含量, mg/g; S_{21}' —煤油和柴油含量, mg/g; S_{22}' —蜡质和重油含量, mg/g; S_{23}' —胶质和沥青质含量, mg/g。

参 考 文 献

- [1] 宋岩, 罗群, 姜振学, 等. 中国中西部沉积盆地致密油富集机理及其主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 421-433.
SONG Yan, LUO Qun, JIANG Zhenxue, et al. Enrichment of tight oil and its controlling factors in central and western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 421-433.
- [2] 胡素云, 陶士振, 王民, 等. 陆相湖盆致密油充注运聚机理与富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 481-490.
HU Suyun, TAO Shizhen, WANG Min, et al. Migration and accumulation mechanisms and main controlling factors of tight oil enrichment in a continental lake basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 481-490.
- [3] 王福伟, 陈冬霞, 解广杰, 等. 鄂尔多斯盆地庆城地区延长组7段源-储结构控制下致密砂岩油的差异富集机制[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 941-956.
WANG Fuwei, CHEN Dongxia, XIE Guangjie, et al. Differential enrichment mechanism of tight sandstone oil under the control of the source-reservoir structures of Member 7 of Yanchang Formation in Qingcheng area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 941-956.
- [4] 庞正炼, 陶士振, 张景建, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段致密油多尺度差异化富集及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1301-1311.
PANG Zhenglian, TAO Shizhen, ZHANG Jingjian, et al. Differentiation accumulation in multiple scales of tight oil and its main controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1301-1311.
- [5] 庞正炼, 陶士振, 张琴, 等. 四川盆地侏罗系致密油二次运移机制与富集主控因素[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1211-1222.
PANG Zhenglian, TAO Shizhen, ZHANG Qin, et al. Secondary migration mechanism and accumulation controlling factors of Jurassic tight oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1211-1222.
- [6] HUBBERT M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1954-2026.
- [7] 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.
- [8] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1978, 42(1): 77-95.
- [9] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Paleoreconstruction by biological

- markers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(6): 783-794.
- [10] LUO X R, ZHANG L Q, ZHANG L K, et al. Heterogeneity in siliciclastic carrier beds: implications for hydrocarbon migration and accumulation[J]. *AAPG Bulletin*, 2023, 107(7): 1017-1036.
- [11] THOMAS M M, CLOUSE J A. Scaled physical model of secondary oil migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(1): 19-28.
- [12] 付晓飞, 杨勉, 吕延防, 等. 库车坳陷典型构造天然气运移过程物理模拟[J]. *石油学报*, 2004, 25(5): 38-43.
- FU Xiaofei, YANG Mian, LÜ Yanfang, et al. Physical simulation on gas migration process of typical structure in Kuqa depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 38-43.
- [13] 刘文汇, 王晓锋, 腾格尔, 等. 中国近十年天然气示踪地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(3): 279-289.
- LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, Tenger, et al. Research progress of gas geochemistry during the past decade in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(3): 279-289.
- [14] 吴楠, 刘显凤, 徐涛. 油气运移路径示踪研究[J]. *特种油气藏*, 2007, 14(3): 28-31.
- WU Nan, LIU Xianfeng, XU Tao. Study on the trace of hydrocarbon migration path[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2007, 14(3): 28-31.
- [15] HINDLE A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [16] HAO Fang, ZOU Huayao, GONG Zaisheng, et al. Petroleum migration and accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay Basin, China: significance of preferential petroleum migration pathways (PPMP) for the formation of large oilfields in lacustrine fault basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(1): 1-13.
- [17] 王汇彤, 张大江, 张水昌, 等. 油气二次运移地球化学常用参数变化规律的新认识——石油二次运移模拟实验的启示和思考[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 342-347.
- WANG Huitong, ZHANG Dajiang, ZHANG Shuichang, et al. Understanding on the geochemical parameters used for secondary oil migration: revelation from simulation experiment of secondary oil migration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 342-347.
- [18] 庞正炼, 陶士振, 张琴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段夹层型页岩系石油富集规律与主控因素[J]. *地学前缘*, 2023, 30(4): 152-163.
- PANG Zhenglian, TAO Shizhen, ZHANG Qin, et al. Interbedded shale formation of the 7th Member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin: petroleum accumulation patterns and controlling factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 152-163.
- [19] 冯军, 张博为, 冯子辉, 等. 松辽盆地北部致密砂岩储集层原油可动性影响因素[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 312-321.
- FENG Jun, ZHANG Bowei, FENG Zihui, et al. Crude oil mobility and its controlling factors in tight sand reservoirs in northern Songliao Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 312-321.
- [20] 吴蒙, 秦勇, 王晓青, 等. 中国致密砂岩储层流体可动性及其影响因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 35-51.
- WU Meng, QIN Yong, WANG Xiaoqing, et al. Fluid mobility and its influencing factors of tight sandstone reservoirs in China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 35-51.
- [21] 李士祥, 郭芪恒, 潘松圻, 等. 烃类源内微运移对页理型页岩油差异富集的影响——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 46-54.
- LI Shixiang, GUO Qiheng, PAN Songqi, et al. Influence of intra-source micro-migration of hydrocarbons on the differential enrichment of laminated type shale oil: a case study of the third sub-member of the seventh Member of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 46-54.
- [22] 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.
- [23] 廉欢, 查明, 高长海, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组异常高压与致密油富集[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(2): 163-168.
- LIAN Huan, ZHA Ming, GAO Changhai, et al. Abnormal high pressure and tight oil enrichment of Lucaogou Formation in Jimusar sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(2): 163-168.
- [24] 赖仁. 吉木萨尔凹陷芦草沟组超压演化及其对致密油富集的影响[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- LAI Ren. Evolution of overpressure and its influence on enrichment of tight oil of Lucaogou Formation in Jimsar depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [25] 郭旭升, 胡宗全, 申宝剑, 等. 中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(11): 1565-1578.
- GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, et al. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(11): 1565-1578.
- [26] 姚泾利, 曾澍辉, 罗安湘, 等. 致密储层源储结构对储层含油性的控制作用——以鄂尔多斯盆地合水地区长6~长8段为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3): 267-280.
- YAO Jingli, ZENG Jianhui, LUO Anxiang, et al. Controlling effect of source-reservoir structure in tight reservoir on oil-bearing property—a case study of chang-6-chang-8 members in Heshui area of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3): 267-280.
- [27] 罗群, 魏浩元, 刘冬冬, 等. 层理缝在致密油成藏富集中的意义、研究进展及其趋势[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(1): 1-7.
- LUO Qun, WEI Haoyuan, LIU Dongdong, et al. Research significance, advances and trends on the role of bedding fracture in tight oil accumulation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(1): 1-7.
- [28] 陶士振, 胡素云, 王建, 等. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1222-1239.
- TAO Shizhen, HU Suyun, WANG Jian, et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1222-1239.
- [29] 王道伸, 辛红刚, 蒯克来, 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, XIA 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 For-

- mation in Zhijing-Ansai area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(4): 623-634.
- [30] 孙雨, 邓明, 马世忠, 等. 松辽盆地大安地区扶余油层致密砂岩油分布特征及控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 589-597.
- SUN Yu, DENG Ming, MA Shizhong, et al. Distribution and controlling factors of tight sandstone oil in Fuyu oil layers of Da'an area, Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 589-597.
- [31] WANG Fuwei, CHEN Dongxia, YAO Dongsheng, et al. Disparities in tight sandstone reservoirs in different source-reservoir assemblages and their effect on tight oil accumulation: Triassic Chang 7 Member in the Qingcheng area, Ordos Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 217: 110914.
- [32] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. *石油学报*, 2021, 42(5): 561-569.
- FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5): 561-569.
- [33] 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.
- [34] ZHENG Ruihui, ZENG Wenren, LI Zhipeng, et al. Differential enrichment mechanisms of organic matter in the Chang 7 Member mudstone and shale in Ordos Basin, China: constraints from organic geochemistry and element geochemistry[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 601: 111126.
- [35] NIU Xiaobing, YANG Tian, CAO Yingchang, et al. Characteristics and formation mechanisms of gravity-flow deposits in a lacustrine depression basin: examples from the Late Triassic Chang 7 oil Member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 148: 106048.
- [36] 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 沉积相分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 254-263.
- YANG Hua, DOU Weitan, LIU Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of Member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 254-263.
- [37] 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 Xinpeng, et al. New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2070-2090.
- [38] 赵向原, 曾联波, 王晓东, 等. 鄂尔多斯盆地宁县—合水地区长 6、长 7、长 8 储层裂缝差异性及其开发意义[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 274-285.
- ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, WANG Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir Ningxian-Heshui area, Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 274-285.
- [39] 刘格云, 黄臣军, 周新桂, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组裂缝发育程度定量评价[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(4): 444-453.
- LIU Geyun, HUANG Chenjun, ZHOU Xingui, et al. Quantitative evaluation of fracture development in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 444-453.
- [40] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 174-180.
- ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Chengen, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 174-180.
- [41] 李文芳. 鄂尔多斯盆地镇原—华池地区长 7 段致密储层综合评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- LI Wenfang. The comprehensive assessment on Chang-7 tight reservoir of Triassic Yanchang Formation in Zhenyuan-Huachi area of Ordos Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [42] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(5): 15-20.
- ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(5): 15-20.
- [43] 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 Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 601-614.
- [44] 付锁堂, 付金华, 牛小兵, 等. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 777-795.
- FU Suotang, FU Jinhua, NIU Xiaobing, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 777-795.
- [45] 马文忠, 王永宏, 张三, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长 7 段页岩油储层微观特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1810-1821.
- MA Wenzhong, WANG Yonghong, ZHANG San, et al. Microscopic characteristics and controlling factors of Chang 7 Member shale oil reservoir in northern Shaanxi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1810-1821.
- [46] 刘桃. 新安边油田长 7 致密油充注动力学机制研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- LIU Tao. Research on the charging dynamic mechanism of Chang 7 tight oil in Xin'anbian oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [47] 康昱, 陈刚, 张卫刚, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油区铁边城区块长 8 储层成岩致密化及其与油气成藏关系[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(2): 64-75.
- KANG Yu, CHEN Gang, ZHANG Weigang, et al. Diagenetic densification of Chang 8 sandstone reservoirs and its relationship with hydrocarbon accumulation in Tiebiancheng area, Jiyuan oilfield, Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technol-*

- ogy, 2021, 40(2): 64-75.
- [48] 胡涛, 姜福杰, 庞雄奇, 等. 页岩油微运移识别、评价及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 114-126.
HU Tao, JIANG Fujie, PANG Xiongqi, et al. Identification and evaluation of shale oil micro-migration and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 114-126.
- [49] HU Tao, LIU Yuan, JIANG Fujie, et al. A novel method for quantifying hydrocarbon micromigration in heterogeneous shale and the controlling mechanism[J]. Energy, 2024, 288: 129712.
- [50] 蒯克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244-1255.
XI Kelai, LI Ke, CAO Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang 7₃ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244-1255.
- [51] 安成, 柳广弟, 孙明亮, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段页岩纹层发育特征及类型划分[J]. 石油科学通报, 2023, 8(2): 125-140.
AN Cheng, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Development characteristics and classification of shale laminae in the Chang 7₃ sub-member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(2): 125-140.
- [52] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.
ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 973-998.
- [53] 王帅. 延长油田长7段致密油生烃增压及其对成藏的控制[D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
WANG Shuai. Overpressure evolution caused by hydrocarbon generation of Chang 7 section in Yanchang oilfield and its control effect on accumulation[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [54] 徐泽阳, 刘震, 赵靖舟, 等. 基于测井响应特征的烃源岩超压成因分析——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段烃源岩为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1950-1960.
XU Zeyang, LIU Zhen, ZHAO Jingzhou, et al. Origin analysis of paleo-overpressure of source rock based on logging response characteristics: case study of the source rocks in the 7th Member of Yanchang Formation of Triassic, Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1950-1960.
- [55] GUO Xiaowen, HE Sheng, LIU Keyu, et al. Quantitative estimation of overpressure caused by oil generation in petroliferous basins[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(11): 1343-1350.
- [56] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [57] CUI Jingwei, ZHANG Zhongyi, LIU Guanglin, et al. Breakthrough pressure anisotropy and intra-source migration model of crude oil in shale[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 135: 105433.
- [58] LIU Bo, YANG Yuqi, LI Jiangtao, et al. Stress sensitivity of tight reservoirs and its effect on oil saturation: a case study of Lower Cretaceous tight clastic reservoirs in the Hailar Basin, Northeast China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106484.
- [59] 姚东升, 陈冬霞, 李莎, 等. 差异源储结构下储层发育机制及其对油气富集的影响——以鄂尔多斯盆地庆城地区长7₁₋₂段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(2): 346-363.
YAO Dongsheng, CHEN Dongxia, LI Sha, et al. Reservoir development mechanism and its influence on oil and gas under differential source and reservoir structure: a case study from Chang7₁₋₂ tight sandstone of Qingcheng area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 346-363.
- [60] HU Tao, PANG Xiongqi, XU Tianwu, et al. Identifying the key source rocks in heterogeneous saline lacustrine shales: Paleogene shales in the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2022, 106(6): 1325-1356.
- [61] 罗晓容, 雷裕红, 张立宽, 等. 油气运移疏导层研究及量化表征方法[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 428-436.
LUO Xiaorong, LEI Yuhong, ZHANG Likuan, et al. Characterization of carrier formation for hydrocarbon migration: concepts and approaches[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 428-436.
- [62] GAO Zhiye, DUAN Longfei, JIANG Zhenxue, et al. Using laser scanning confocal microscopy combined with saturated oil experiment to investigate the pseudo in-situ occurrence mechanism of light and heavy components of shale oil in sub-micron scale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2023, 220: 111234.
- [63] 鲁锋, 李照阳, 杨召, 等. 激光扫描共聚焦显微分析技术表征页岩亚微米级孔隙中的含油性——以准噶尔盆地芦草沟组页岩为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 193-202.
LU Feng, LI Zhaoyang, YANG Zhao, et al. Characterization of oil-bearing properties in sub-micron shale pores by laser scanning confocal microscopy technology: a case study of shale in Lucaogou Formation, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 193-202.
- [64] 邬立言, 张振苓, 马文玲. 储油岩油气组分的定量分析方法[J]. 录井技术, 2000, 11(3): 50-58.
WU Liyan, ZHANG Zhenling, MA Wenling. Quantitative analysis method for reservoir rock oil and gas component[J]. Mud Logging Engineering, 2000, 11(3): 50-58.
- [65] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842-849.
JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 842-849.

(收稿日期 2024-05-15 改回日期 2024-12-09 编辑 雷永良)