

引用: 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 7_3 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 intrasource 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.

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 7_3 亚段为例

李士祥^{1,2} 郭芪恒^{1,2} 潘松圻³ 周新平^{1,2} 郭睿良⁴

(1 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室; 2 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院; 3 中国石油深圳新能源研究院有限公司;
4 西安石油大学地球科学与工程学院)

摘要: 受陆相页岩多纹层类型、高密度纹层特征的影响, 烃类源内差异微运移成为控制不同岩相页岩含油性及其可动性的重要因素。以鄂尔多斯盆地10口系统取心井为对象, 利用X-射线衍射、薄片观察、扫描电镜、氮气吸附、激光共聚焦、地球化学等分析测试手段, 结合测井及试油资料, 对三叠系延长组长 7_3 亚段页岩中烃类的微运移现象及微运移机理进行分析。研究发现页岩中富有机质纹层生成的原油普遍发生微米—毫米尺度的微运移, 其中生烃增压提供了微运移动力; 频繁发育的刚性纹层为微运移的烃类提供大量聚集空间; 生烃增压缝—页理缝—微裂缝为微运移提供了通道; 纹层矿物组成差异造成烃类分异。纹层的组合类型及差异微运移机理决定了长英质纹层页岩和凝灰质纹层页岩具有相对较好的含油性及其可动性, 是中—高成熟度页理型页岩油风险勘探的主要岩相类型。 7_3 口直井在长 7_3 亚段页岩中试油获10t/d以上的工业油流, 证明长 7_3 亚段页岩段含油性好, 水平井开发提产潜力大, 有望成为鄂尔多斯盆地页岩油增储上产的接替领域。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 页岩油; 长 7_3 亚段; 源内微运移

中图分类号: TE112.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.005

Influence of intrasource 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

Li Shixiang^{1,2}, Guo Qiheng^{1,2}, Pan Songqi³, Zhou Xinping^{1,2}, Guo Ruiliang⁴

(1 National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields; 2 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Changqing Oilfield Company; 3 PetroChina Shenzhen New Energy Research Institute Co., Ltd.; 4 School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University)

Abstract: Influenced by multi type and high density laminae of continental shale, the differential intrasource micro-migration of hydrocarbons is an important factor controlling the oil-bearing property and mobility of the laminated shale with various lithofacies. By taking the systematic shale coring sections in 10 wells in Ordos Basin as the research object and using laboratory experimental results such as XRD, thin section observation, SEM, nitrogen absorption, laser scanning confocal, geochemical test, as well as wireline logging and well testing results, the

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性研究重大科技项目“鄂尔多斯盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1806)。

第一作者简介: 李士祥(1981—), 男, 湖北钟祥人, 博士, 2017年毕业于成都理工大学, 教授级高级工程师, 现从事页岩油勘探开发及综合研究工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路151号中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 邮政编码: 710018。E-mail: sxlee1981_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 郭芪恒(1994—), 男, 甘肃庆阳人, 在读博士, 主要从事页岩油勘探开发及综合研究工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路151号中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 邮政编码: 710018。E-mail: guoqh_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-03-31; 修改日期: 2023-06-20

hydrocarbon micro-migration inside shale section in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation (referred to as Chang 7₃ sub-member) and the mechanism are analyzed. The study results show that the micro-millimeter scale migration generally occurred of crude oil generated by organic-rich laminated shale. Among them, hydrocarbon generation pressurization provided forces for micro-migration; The frequently developed brittle laminae provided a large amount of reservoir space for the micro migrated hydrocarbon; The hydrocarbon generation pressurization fractures, foliation fractures, and micro fractures provided pathways for micro-migration; The different mineral compositions of the laminae resulted in hydrocarbon differentiation. The combination type of laminae and differential micro-migration mechanism determine that the felsic laminated shale and tuffaceous laminated shale have relatively good oil-bearing property and mobility, which are the main lithofacies types for risk exploration of medium-high maturity laminated type shale oil. The commercial oil flow of more than 10 t/d was obtained in pilot test of Chang 7₃ sub-member shale in seven vertical wells, confirming that shale section in Chang 7₃ sub-member has good oil-bearing property, and there is a high potential of production increase by horizontal well development, which is expected to be a replacement field for reserve and production increase of shale oil in Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin, shale oil, Chang 7₃ sub-member, micro-migration inside source rock

0 引言

历经 10 余年的理论和技术攻关, 中国相继在准噶尔、鄂尔多斯、三塘湖、松辽、渤海湾、柴达木等盆地取得页岩油勘探开发的重大突破^[1-5]。2022 年中国页岩油产量突破 $300 \times 10^4 \text{t}$, 成功实现了陆相页岩油规模勘探和效益开发。尽管夹层型页岩油是当前中国陆相页岩油开发的主体对象, 但随着勘探开发逐渐规模化, 优质储层比例明显下降, 以页岩基质孔隙中大量滞留的原油为代表的页理型页岩油必将成为未来上产的资源主体。

随着源内运移以及微运移现象不断提出, 页岩油成藏特征已经不能用简单的“源储一体”来概括^[6-11]。与岩性相对单一、连续性好、厚度大的海相泥页岩相比, 陆相泥页岩受构造、气候、物源等多种因素控制, 具有多类型韵律性纹层频繁交互、非均质性强、横向变化快的特征^[12-17]。受不同纹层有机质丰度及渗流能力差异的影响, 泥页岩中普遍存在富有机质层段排烃、贫有机质层段作为储层蓄烃的特点^[9,11]。在源内烃类的纹层间微米级尺度以及顺微裂缝—页理缝发生毫米—厘米级微运移作用的控制下, 高纹层频率、高页理缝密度的纹层状页岩普遍成为页理型页岩油勘探开发的主要对象, 并且纹层的结构决定了页岩油微观运聚特征, 同时影响了滞留烃含量、流体可动性及压裂改造效果^[10,18-20]。源内微运移作用成为控制陆相多类型页岩油多层系含油、多甜点富集的主要机制。

鄂尔多斯盆地长 7₃ 亚段沉积期是三叠系延长组最大湖泛期, 形成了一套沉积厚度大、分布稳定的富有机质泥页岩, 具备页理型页岩油富集的地质基础^[21]。先前对长 7₃ 亚段纯页岩的研究主要集中在烃源岩评价方面, 由于对其作为页岩油储层的甜点控制因素、微观富集规律和压裂改造技术等认识不足, 长 7₃ 亚段页理型页岩油目前只在盆地零星分布

的直井中开展尝试性探索, 部分井压裂试油获得突破, 但试采效果不理想, 大多数井试采不到一个月就没有液量了。在前人相关研究的基础上, 本文以长 7₃ 亚段泥页岩为研究对象, 利用测井、录井、取心资料及分析化验资料综合分析了页岩滞留烃类的微运移机理, 明确了微运移机制控制下的不同岩相页岩油差异富集原因, 以期对长 7₃ 亚段页理型页岩油勘探部署提供理论依据及指导。

1 地质概况

长 7 段沉积期是鄂尔多斯盆地内陆坳陷湖盆发育的鼎盛期, 形成了面积达 $6.5 \times 10^4 \text{km}^2$ 的半深湖—深湖区, 整体沉积了一套以富有机质页岩、暗色泥岩夹薄层粉砂岩、细砂岩为主的泥页岩层系, 最大厚度可达 110m^[22] (图 1)。长 7 段沉积期, 鄂尔多斯盆地古气候温暖湿润, 为典型的淡水湖盆, 古水体为贫氧还原环境, 有利于半深湖—深湖亚相沉积有机质的保存。长 7₃ 亚段沉积期不仅是最大湖泛期, 也是湖泊热流体活动的高峰期, 藻类和浮游生物的繁盛不仅为该期富有机质泥页岩的沉积奠定了物质基础, 同时也为大规模页岩油的富集创造了有利的物质条件。长 7₃ 亚段黑色页岩的面积达 $4.3 \times 10^4 \text{km}^2$, 最大累计厚度可达 50m, 平均累计厚度为 13.9m; 暗色泥岩的面积达 $6.2 \times 10^4 \text{km}^2$, 最大累计厚度达 40m, 平均累计厚度为 11.3m, 是页理型页岩油主要分布层位。

2 微运移现象

长 7₁₋₂ 亚段发育典型的夹层型页岩油, 物性较好的、没有生油能力的、重力流成因的粉砂岩、细砂岩夹层受与其相邻的富有机质泥页岩强生烃—排烃作用影响, 发生了厘米—米级的宏观烃类运移富集, 成为夹层型页岩油规模富集与效益开发的关键因素^[23-24]。长 7₃ 亚段普遍发育一套厚层的富有机质泥页岩, 热

演化程度适中(盆地长7段 R_o 大多为0.7%~1.2%), 约为60%, 泥页岩内部可达已生烃量40%的滞留烃处于生烃高峰期。长7₃亚段泥页岩的排烃效率平均 不容小觑, 资源潜力巨大^[25]。

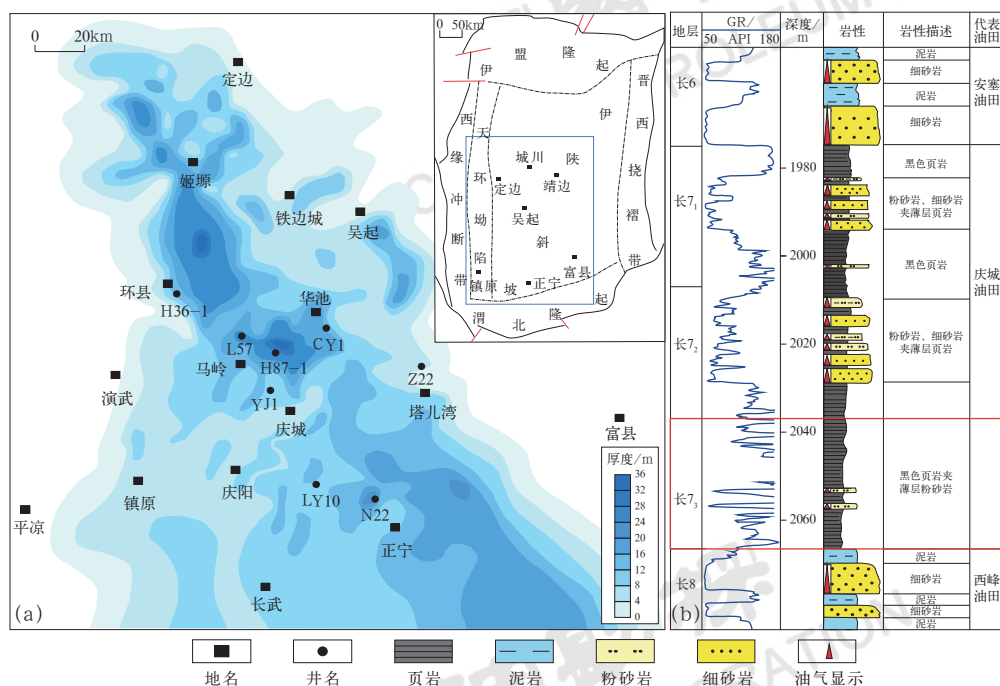


图1 鄂尔多斯盆地长7₃亚段黑色页岩平面分布图(a)及地层特征图(b)

Fig.1 Plane distribution of black shale in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation (a) and stratigraphic features (b) in Ordos Basin

本文定义的源内微运移指页岩中具有较强生烃能力的富有机质纹层在热演化成熟阶段生成的烃类, 在微观尺度上向相邻的不具备生烃能力或弱生烃能力的、储集性能较好的纹层及页岩缝运移聚集的现象。受泥页岩矿物组分非均质影响, 滞留烃在泥页岩内部普遍

发生了微米级的微运移。激光共聚焦荧光三维可视化分析表明, 泥页岩中富含陆源碎屑的长英质纹层或团块含油性普遍优于黏土质纹层和富有机质纹层(图2)。荧光薄片也显示富有机质纹层和黏土质纹层荧光暗、重质组分多, 以干酪根和吸附态烃为主(图3); 长英质纹

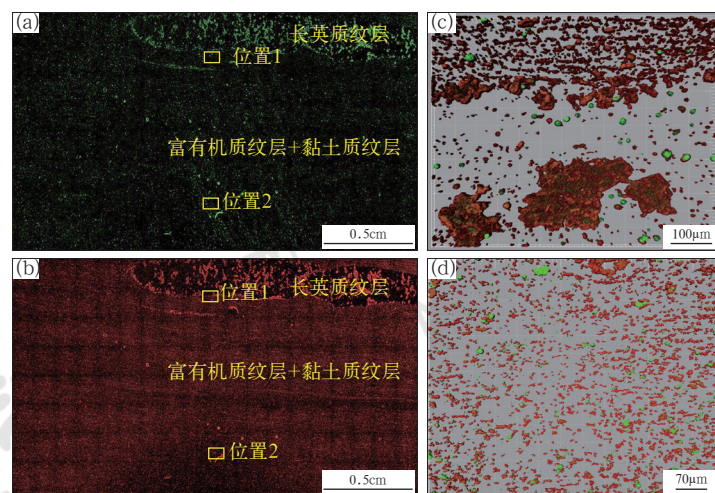


图2 H36-1井黑色页岩不同纹层含油性激光共聚焦荧光三维可视化对比图(长7段, 2081.4m)

Fig.2 Comparison of 3D visualization of laser confocal fluorescence of various oil-bearing laminae in black shale in Well H36-1 (the seventh member of Yanchang Formation, 2081.4 m)

(a) 轻质组分分布图(绿色); (b) 重质组分分布图(红色), 与(a)同视域; (c) 对应(a)、(b)位置1局部放大特征; (d) 对应(a)、(b)位置2局部放大特征; (c)、(d)中绿色代表轻质组分, 红色代表重质组分

层和凝灰质纹层荧光亮、轻质组分多,以游离态烃为主。长 7_3 亚段页岩中长英质纹层内的原油与富有机质纹层中吸附的残留原油具有基本一致的激光拉曼光

谱特征,光谱曲线上D峰和G峰的峰位移完全重合^[26],证实了富有机质纹层中生成的原油发生了微运移,并在物性较好的粉砂级长英质纹层中发生了聚集。

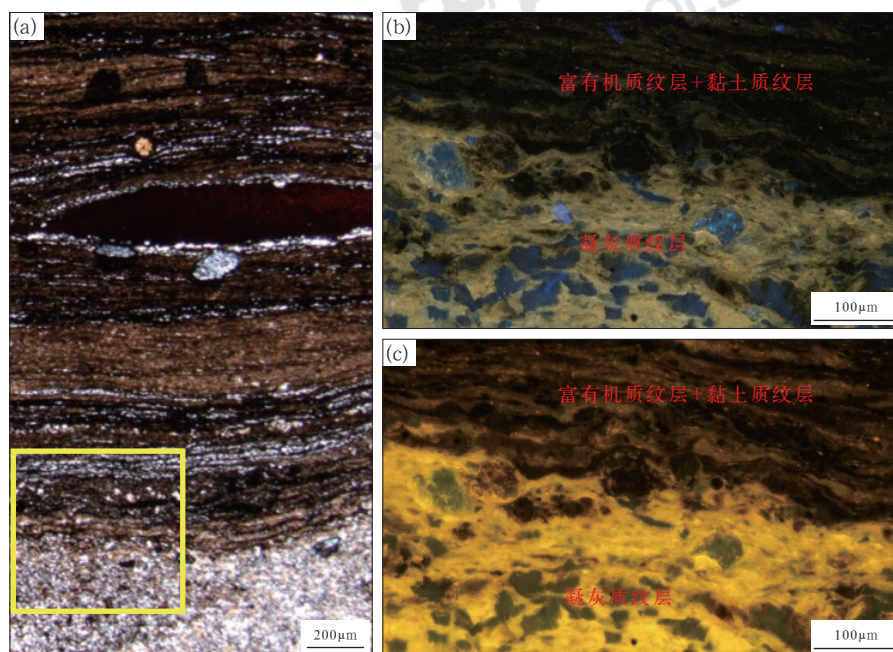


图3 YY1井长 7_3 亚段黑色页岩荧光特征图

Fig.3 Fluorescence characteristics of black shale in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation in Well YY1

(a) 多类型纹层特征,单偏光,230.1nm; (b) 对应(a)黄色框位置局部放大特征,紫外光激发荧光照片,凝灰质纹层含油性好; (c) 对应(a)黄色框位置局部放大特征,蓝光激发荧光照片,凝灰质纹层含油性好

3 微运移机理

泥页岩中源内烃类微运移机理成为控制泥页岩含油性及可动性的重要因素。

3.1 生烃增压提供了微运移动力

长 7_3 亚段黑色页岩具有主生烃相对较早、生烃量大、生烃率高的特征,生烃增压为烃类源内微运移提供了动力。生烃体积膨胀力计算结果表明^[27],当长7段优质烃源岩有机碳含量(TOC)为10%, R_o 为0.8%~1.0%时,生烃作用引起的体积膨胀率为11%~15%。可见,长7段优质烃源岩在达到成熟阶段以后,其生烃作用所产生的体积膨胀幅度十分可观。与生烃作用产生的体积膨胀率相对应,随着烃源岩有机碳含量的增高、热演化程度(R_o)的增大,有机质生烃作用所产生的体积膨胀力也增大。当长7段烃源岩有机碳含量为10%, R_o 为0.8%~1.0%时,生烃作用所引起的体积膨胀力高达119~156MPa(图4)。虽然该计算方法比较粗略,把整个生烃过程看作是封

闭系统且不计干酪根热降解过程中体积收缩产生的空间,但足以说明优质烃源岩的生烃作用可以产生强大的体积膨胀力,完全可以克服毛细管压力作为烃类微运移的动力。

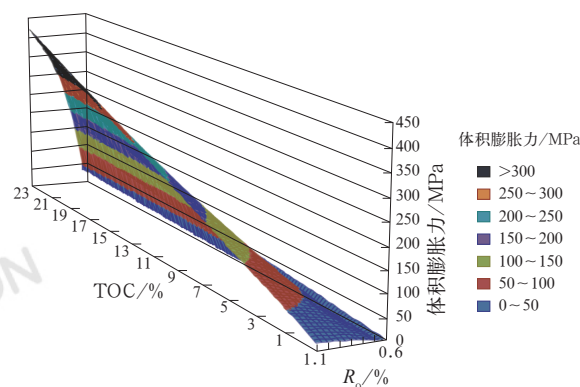


图4 鄂尔多斯盆地长7段优质烃源岩有机质生烃作用引起的体积膨胀力与TOC、 R_o 关系图

Fig.4 Relationship between volume expansibility caused by hydrocarbon generation of organic matter and TOC, R_o of high-quality source rock in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

3.2 频繁发育的刚性纹层为烃类微运移提供大量聚集空间

受古气候、陆源碎屑供给、火山活动的影响,长₇₃亚段黑色页岩普遍发育富有机质纹层、长英质纹层、黏土质纹层和凝灰质纹层,多类型纹层频繁交互(图5)。长石和石英矿物的含量与页岩的孔隙直径成正比,黏土矿物含量与孔隙直径成反比(图6),页岩

中长英质纹层孔隙直径明显高于黏土矿物纹层,富有机质纹层孔隙直径更低^[10]。长英质页岩平均面孔率为0.023%,平均孔隙直径为366nm;黏土质页岩平均面孔率为0.016%,平均孔隙直径为316nm,长英质页岩渗流和储集能力优于黏土质页岩(图7)。长₇₃亚段黑色页岩中频繁发育的长英质、凝灰质等高孔渗刚性纹层内发育的大量微纳米孔喉系统为页岩中优质烃类的聚集提供了大量可容纳空间。

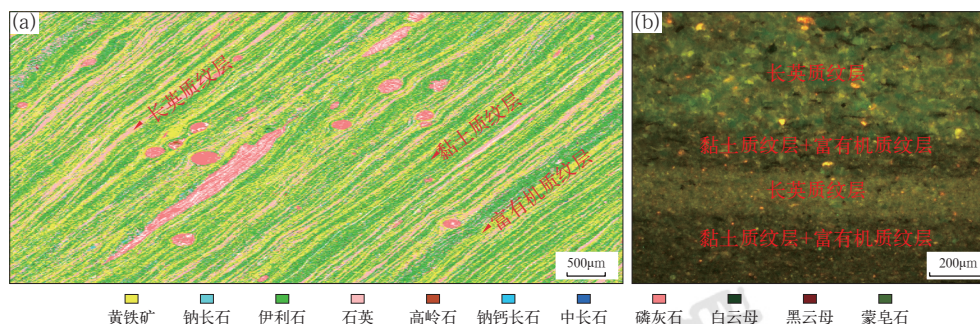


图5 鄂尔多斯盆地长₇₃亚段黑色页岩多类型纹层特征

Fig.5 Characteristics of multi type laminae of black shale in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

(a) CY1井, 2018.7m, 矿物扫描成像图, 多纹层频繁交互; (b) L57井, 2321.61m, 不同类型纹层含油特征, 荧光照片

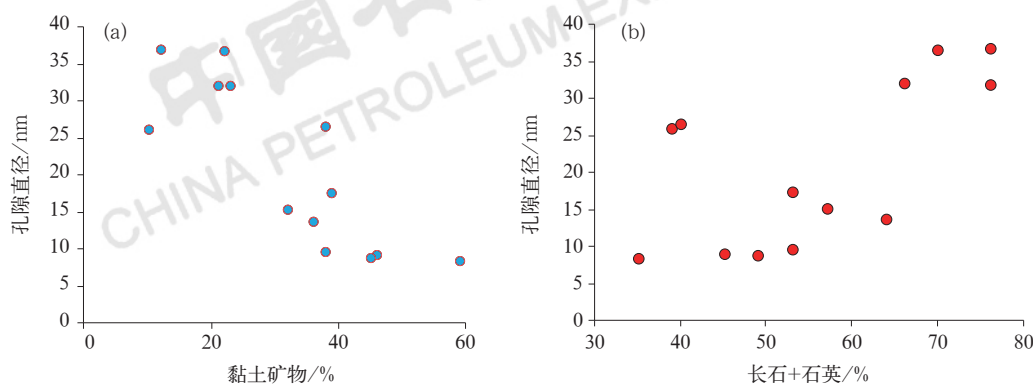


图6 鄂尔多斯盆地长₇₃亚段矿物组分与孔隙直径关系图

Fig.6 Relationship between mineral composition and pore diameter in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

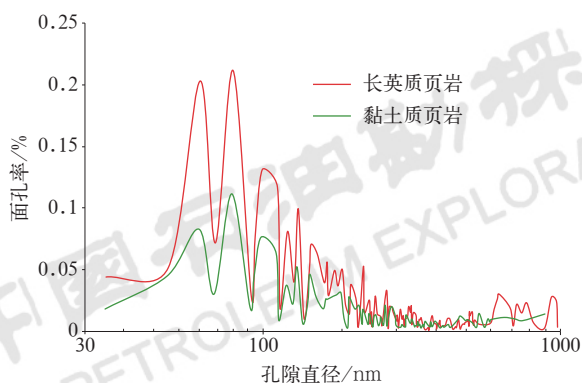


图7 不同类型页岩孔隙直径分布图

Fig.7 Pore diameter distribution of different types of shales

3.3 生烃增压缝—页理缝—微裂缝为微运移提供了通道

受富有机质页岩强生烃—排烃影响,页岩中富有机质纹层生烃过程中产生的生烃增压缝极其发育,为烃类从富有机质纹层垂向上向与其相邻的高孔渗刚性纹层高效运移提供了通道;页岩中多类型、高密度纹层的发育导致其页理缝发育的程度很高,页理缝的开度一般为几百纳米至数十微米,充填较弱,有效性好,是烃类在页岩内部侧向运移的高速通道^[28](图8)。长₇段油气主要成藏期正好处于断裂活动期^[25,29],长

7₃亚段也发育大量的微裂缝。荧光薄片、激光共聚焦荧光三维可视化分析表明页岩中微裂缝含油性较好, 并且富含轻质烃类, 为烃类在微纳米尺度运移提供了优势通道(图9)。在微裂缝评价的时候要特别注意

微裂缝的尺度刻画, 大规模发育的断裂系统会破坏长7₃亚段页理型页岩油的保存条件, 导致较多的可动烃难以保留在页岩中, 对页理型页岩油的富集和经济可采不利^[25]。

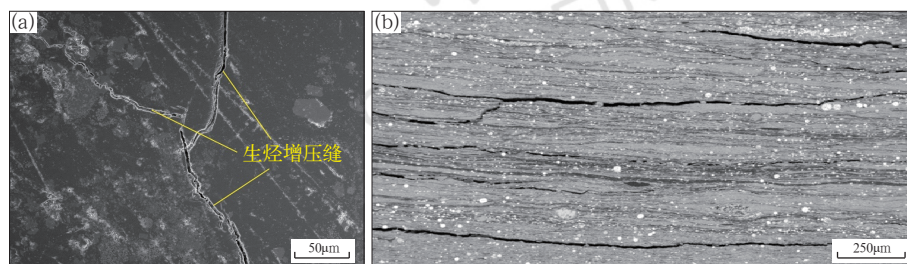


图8 鄂尔多斯盆地长7₃亚段黑色页岩中生烃增压缝及页理缝特征图

Fig.8 Characteristics of hydrocarbon generation pressurization fractures and bedding fractures in black shale in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin
(a) YJ1井, 长7段, 2075.4m, 生烃增压缝特征; (b) LY10井, 长7段, 1670.42m, 开启的页理缝

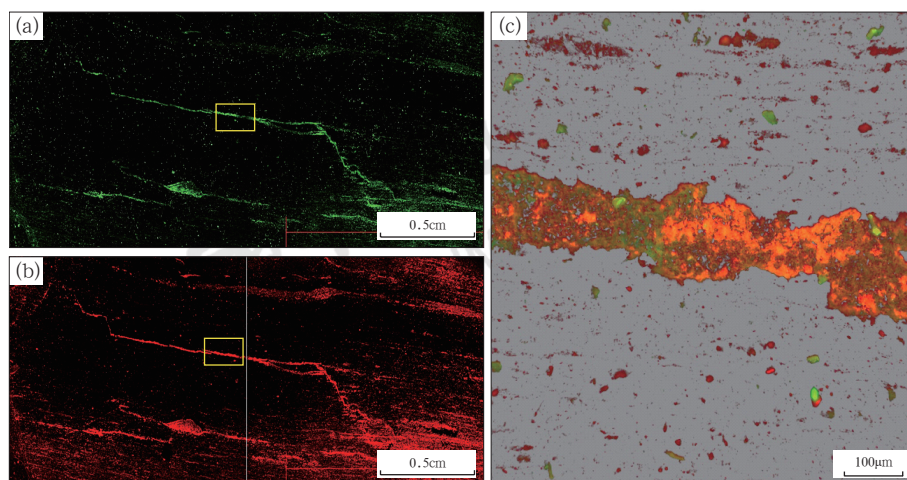


图9 H87-1井长7₃亚段页岩微裂缝含油性激光共聚焦荧光三维可视化特征图

Fig.9 3D visualization of laser confocal fluorescence of oil-bearing property of shale micro fractures in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation in Well H87-1

(a) 轻质组分分布图(绿色), 裂缝含油性好; (b) 重质组分分布图(红色), 裂缝含油性好; (c) 对应(a)、(b)中黄色框位置局部放大特征图, 裂缝含油性好, 是原油运移的重要通道, 绿色代表轻质组分, 红色代表重质组分

3.4 纹层矿物组成差异造成烃类分异

纹层状黑色页岩在荧光薄片可见黄绿色的油质沥青与褐色的胶质沥青明暗相间, 其中油质沥青主要富集于长英质纹层及凝灰质纹层, 胶质沥青则主要富集于富有机质纹层和黏土质纹层(图5b)。长英质矿物含量越高, 饱和烃和芳香烃等轻质组分含量越高, 沥青质和非烃等重质组分含量越少, 原油品质就越好, 可动性强; 黏土矿物含量越高, 沥青质和非烃等重质组分含量越高, 原油黏度就越大, 可动性差^[11]。纹层矿物组成的差异造成了烃类分异。氯仿抽提结果也表明长英质页岩相比黏土质页岩具有更多的饱和烃和芳香烃(图10), 流动性最好。

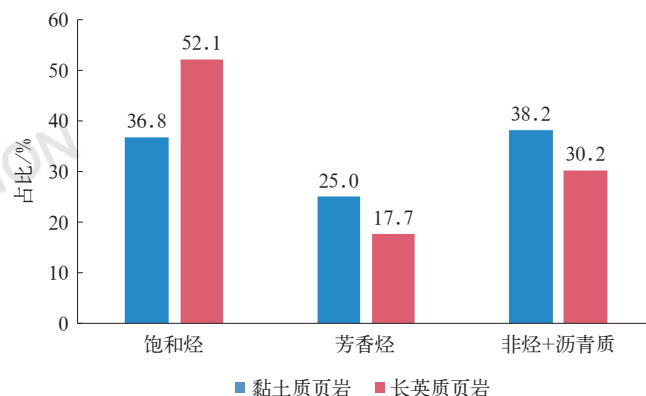


图10 鄂尔多斯盆地黑色页岩抽提物族组分特征图

Fig.10 Characteristics of extracts group components of black shale in Ordos Basin

受源内微运移机理的控制,长 7_3 亚段页理型页岩油富集的特点主要是:(1)富有机质纹层在 $R_o>0.8\%$ 时进入生烃高峰期,较高的瞬时转化率和瞬时生烃量使富有机质纹层聚集了大量高势能富烃优质流体^[11],同时也产生强大的体积膨胀力和大量生烃增压缝,是源内微运移排烃的主体纹层;(2)频繁发育的刚性纹层内发育的尺度较大的微纳米孔喉系统构成了优势烃类聚集的主要空间,同时刚性纹层的发育频率也成了影响页理型页岩油可动性的主要因素;(3)页岩中发育的由大量生烃增压缝—页理缝—微裂缝构成的立体网络系统成为富有机质纹层纵、横向排烃的优势通道,生烃产生的超压为烃类快速运移提供了源源不断的动力。

4 微运移对页岩油差异富集的影响

源内微运移促使页岩油非均匀分布、差异富集,总体上具有高 TOC 段生油、低 TOC 段储油的特征。低 TOC 段往往富含饱和烃和低分子量化合物,具有更高的流动性。长 7_3 亚段产层油与紧邻页岩抽提油色谱图对比发现,产层油碳数以小于 15 为主(图 11),

主要为抽提油主峰碳之前的相对轻质烃类组分。泥页岩高 TOC 生油段排烃量和排烃效率为正值,低 TOC 甜点段普遍为负值,并且饱和烃和芳香烃的比例明显较高,油饱和度指数 $OSI>100\text{mg/g}$,具有滞留烃超越效应,是页理型页岩油开发的优势段(图 12)。

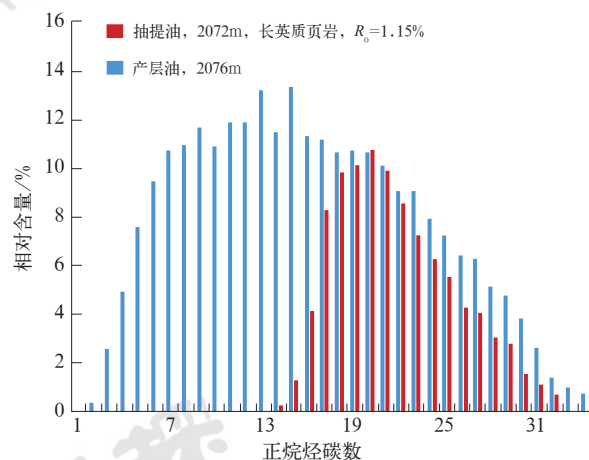


图 11 C96 井长 7_3 亚段产层油与邻近页岩抽提油色谱对比图
Fig.11 Chromatographic comparison of oil produced in Well 96 and that extracted from adjacent shale in the third sub-member of the seventh member of Yanchang Formation

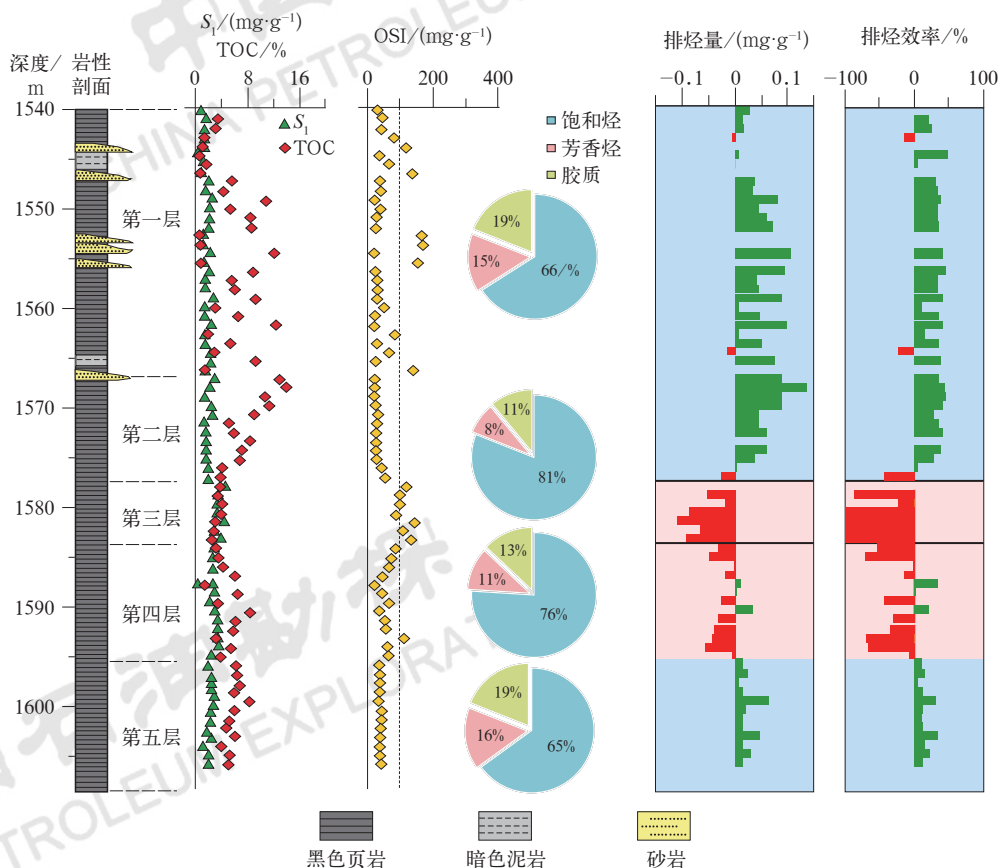


图 12 Z22 井长 7 段地球化学参数柱状图

Fig.12 Geochemical parameters column of the seventh member of Yanchang Formation in Well Z22

长 7_3 亚段低 TOC 段的长英质纹层和凝灰质纹层与高 TOC 段的黏土质纹层及富有机质纹层相比, 孔隙度普遍是高 TOC 段的 2 倍, 中值孔径大 1~2 个数量级。纹层的组合类型及差异微运移机理决定了低 TOC 段的长英质页岩和凝灰质页岩发育段具有相对较好的含油性及可动性, OSI 也普遍较高, 是中—高成熟度页理型页岩油风险勘探的优势岩相类型。

长 7_3 亚段中—高成熟度页理型页岩油 10 口直井压裂突破了出油关, 其中 7 口井试油获 10t/d 的工业油流, 该突破证实页理型页岩油具有水平井规模提产的前景, 展现出良好的勘探开发潜力。在微运移作用的控制下, 富含脆性矿物的长英质页岩和凝灰质页岩不仅是优质烃类聚集的优势岩相, 也是压裂的工程甜点。围绕湖盆中心泥页岩富集区, 开展保存条件、岩相及含油性定量评价测井新技术攻关研究, 是推动页理型页岩油有利区优选及水平井提产靶点确定的重要举措。

5 结论

(1) 受陆相页岩多纹层类型、高密度纹层特征的影响, 烃类源内微运移成为控制中—高成熟度页理型页岩油差异富集的主要因素, 微运移作用导致烃类在多类型纹层中发生了分异现象, 凝灰质纹层和富含陆源碎屑的长英质纹层普遍富含轻质烃类。

(2) 中—高成熟度页理型页岩油普遍具有富有机质纹层生烃增压排烃、生烃增压缝—页理缝—微裂缝运烃、低 TOC 的相对高孔渗刚性纹层聚烃的特点, 小尺度的微裂缝有利于提高页岩中烃类的运移效率并提高页岩油富集程度, 但大规模的断裂会破坏页理型页岩油保存条件, 不利于页岩油源内富集。

(3) 在烃类源内微运移作用的控制下, 纹层的组合类型决定了富含脆性矿物的低 TOC、储集能力相对较好的长英质纹层组合和凝灰质纹层组合是长 7_3 亚段中—高成熟度页理型页岩油勘探的主要岩相类型。

参考文献

- [1] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 99–110.
Xie Jianyong, Cui Xinjiang, Li Wenbo, *et al.* Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 99–110.
- [2] 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.
- [3] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 20–34.
Wang Yuhua, Liang Jiangping, Zhang Jinyou, *et al.* Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 20–34.
- [4] 范谭广, 徐雄飞, 范亮, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 125–136.
Fan Tanguang, Xu Xiongfei, Fan Liang, *et al.* Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 125–136.
- [5] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1059–1066.
Zhou Lihong, Zhao Xianzheng, Chai Gongquan, *et al.* Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: a case study of member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, east China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059–1066.
- [6] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821–835.
Jin Zhijun, Wang Guanping, Liu Guangxiang, *et al.* Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821–835.
- [7] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景: 以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143–162.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143–162.
- [8] 刘鹏, 张磊, 王胜奎, 等. 济阳坳陷古近系页岩油运移路径探讨及其石油地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 89–98.
Liu Peng, Zhang Lei, Wang Shengkui, *et al.* Discussion on migration path of Paleogene shale oil in Jiyang Depression and its petroleum geological significance[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 89–98.
- [9] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224–237.
Hu Suyun, Bai Bin, Tao Shizhen, *et al.* Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224–237.
- [10] 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 等. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 62–72.
Wu Songtao, Zhu Rukai, Luo Zhong, *et al.* Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central–western basins in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 62–72.
- [11] 李士祥, 郭茂恒, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段页岩型页岩油储层特征及勘探方向[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1509–1519.
Li Shixiang, Guo Qiheng, Zhou Xinping, *et al.* Characteristics

- and exploration direction of shale oil in Chang 7₃ sub-member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022,43(11):1509–1519.
- [12] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. *地质学报*, 2022,96(1):155–171.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, *et al.* Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(1):155–171.
- [13] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. *石油与天然气地质*, 2019,40(3):451–458.
- Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, *et al.* Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3):451–458.
- [14] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. *石油学报*, 2021,42(1):1–14.
- Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, *et al.* Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(1):1–14.
- [15] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 2020,42(4):489–505.
- Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, *et al.* Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020,42(4): 489–505.
- [16] 李梦莹, 朱如凯, 胡素云. 海外陆相页岩油地质特征与资源潜力[J]. *岩性油气藏*, 2022,34(1):163–174.
- Li Mengying, Zhu Rukai, Hu Suyun. Geological characteristics and resource potential of overseas terrestrial shale oil[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022,34(1):163–174.
- [17] 石道涵, 张矿生, 唐梅荣, 等. 长庆油田页岩油水平井体积压裂技术发展与应用[J]. *石油科技论坛*, 2022,41(3):10–17.
- Shi Daoan, Zhang Kuangsheng, Tang Meirong, *et al.* Development and application of shale oil horizontal well volume fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022,41(3):10–17.
- [18] 柳波, 迟亚奥, 黄志龙, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷二叠系油气运移机制与页岩油富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2013,34(6):725–730.
- Liu Bo, Chi Yaao, Huang Zhilong, *et al.* Migration mechanism of the Permian hydrocarbon and shale oil accumulation in Malang Sag, the Santanghu Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013,34(6):725–730.
- [19] 张宸嘉, 曹剑, 王俞策, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油富集规律[J]. *石油学报*, 2022,43(9):1253–1268.
- Zhang Chenjia, Cao Jian, Wang Yuce, *et al.* Enrichment law of shale oil of Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022,43(9):1253–1268.
- [20] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(1):73–87.
- Liu Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(1): 73–87.
- [21] 刘显阳, 李士祥, 郭茂恒, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7₃亚段泥页岩层系岩石类型特征及勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2021,32(8): 1177–1189.
- Liu Xianyang, Li Shixiang, Guo Qiheng, *et al.* Characteristics of rock types and exploration significance of the shale strata in the Chang 7₃ sub-member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021,32(8):1177–1189.
- [22] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(6):936–946.
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, *et al.* Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(6): 936–946.
- [23] 付金华, 李士祥, 郭茂恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. *石油学报*, 2022,43(12):1702–1716.
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Guo Qiheng, *et al.* Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022,43(12):1702–1716.
- [24] 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(5):1–11.
- Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, *et al.* Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(5):1–11.
- [25] 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、排烃效率与页岩油富集类型[J]. *石油勘探与开发*, 2023,50(1):1–12.
- 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):1–12.
- [26] 惠克来, 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.
- [27] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 强生排烃特征及机理分析[J]. *石油勘探与开发*, 2006,33(3):289–293.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, *et al.* Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation-hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006,33(3):289–293.
- [28] 李彦录, 陆诗磊, 夏东领, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长7油组页岩层系天然裂缝发育特征及主控因素[J]. *地质科学*, 2022,57(1):73–87.
- Li Yanlu, Lu Shilei, Xia Dongling, *et al.* Development characteristics and main controlling factors of natural fractures in shale series of the seventh member of the Yanchang Formation, southern Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022,57(1):73–87.
- [29] 屈童, 高岗, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地长7段致密油成藏机理分析[J]. *地质学报*, 2022,96(2):616–629.
- Qu Tong, Gao Gang, Liang Xiaowei, *et al.* Analysis of tight oil accumulation mechanism of Chang 7 member in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(2):616–629.