

文章编号: 0253-2697(2023)12-2070-21 DOI:10. 7623/syxb202312005

鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力

刘显阳^{1,2} 李士祥^{1,3} 周新平^{1,3} 陈 修^{1,3} 刘江艳^{1,3} 郭芪恒^{1,3} 魏嘉怡^{1,3} 廖永乐^{1,4}

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018; 2. 中国石油长庆油田公司 陕西西安 710018;
3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018; 4. 中国石油长庆油田公司第五采油厂 陕西西安 710018)

摘要:鄂尔多斯盆地油气资源富集,是中国目前最大的油气生产基地。随着国家能源需求持续增长,鄂尔多斯盆地成为增储上产的主力。近年来,通过地质理论创新和关键技术攻关,鄂尔多斯盆地在石油勘探新领域、新类型方面取得了重大突破和重要进展。通过梳理页岩油、天环坳陷—西缘冲断带、三边地区(靖边—定边—安边)以及延长组下组合 4 大领域,分析其地质条件、勘探进展和资源潜力,取得了以下主要认识:①页岩油有望成为长庆油田 6 000×10⁴t 以上产量可持续发展的主力贡献者。鄂尔多斯盆地发育中生界延长组 7 段、延长组 9 段陆相页岩油和古生界乌拉力克海相页岩油,其中,延长组 7 段夹层型页岩油已落实规模储量 40.5×10⁸t,是目前勘探开发的主要对象;纹层型页岩油实现了战略突破,预计资源潜力为 20×10⁸t;页理型页岩油的攻关试验正稳步推进,攻关如获突破将会产生革命性影响。陕北地区延长组 9 段发育“李家畔页岩”,页岩油风险勘探进展顺利。盆地西缘南段乌拉力克组的勘探露出苗头,开辟了古生界海相页岩油勘探新层系。②天环坳陷—西缘冲断带复杂构造区落实了新的含油富集区,形成了于家梁、环县西、平凉北 3 大接替领域,资源潜力超过 5×10⁸t。③三边地区多层系立体勘探取得新进展,快速建成了郝滩一体化示范区,初步评价三边地区的资源潜力为 3×10⁸t。④延长组下组合展现出较好的勘探前景,延长组 9 段和延长组 10 段甩开勘探发现了多个有利区,落实规模储量近 3×10⁸t。鄂尔多斯盆地总体处于勘探中期,仍具有较大的增储潜力,石油勘探的新领域、新类型将为油田公司的高质量发展提供接替资源。

关键词:鄂尔多斯盆地;新领域;新类型;页岩油;天环坳陷;西缘冲断带;三边地区;延长组下组合

中图分类号:TE132.1 **文献标识码:**A

New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin

Liu Xianyang^{1,2} Li Shixiang^{1,3} Zhou Xinping^{1,3} Chen Xiu^{1,3} Liu Jiangyan^{1,3}
Guo Qiheng^{1,3} Wei Jiayi^{1,3} Liao Yongle^{1,4}

(1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Shaanxi Xi'an 710018, China; 2. PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China;
4. No. 5 Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China)

Abstract: Ordos Basin is rich in oil-gas resources and now is the largest oil-gas production base in China. With the continuously growing energy demand of the country, Ordos Basin has played the main role in increasing reserves and production. In recent years, based on the innovation in geological theory and breakthrough in key technology, major breakthroughs and significant progress have been made in new fields and new types of oil exploration in Ordos Basin. The paper reviews the four fields of shale oil area, Tianhuan depression-western margin thrust belt, Sanbian areas (Jingbian-Dingbian-Anbian areas), and the lower assemblage of Yanchang Formation, and analyzes their geological conditions, exploration progress, and resource potential. On this basis, the key insights were obtained as below. (1) Shale oil is expected to be the main contributor for the sustainable development of production above 6 000×10⁴t in Changqing oilfield. Ordos Basin develops continental shale oil in the Member 7 and 9 of Mesozoic Yanchang Formation, as well as marine shale oil in Paleozoic Wulalike Formation. Specifically, the interbedded shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation has the proven reserves of 40.5×10⁸t, which is the main target for exploration and development; the laminated shale oil has an estimated resource potential of 20×10⁸t, achieving a strategic breakthrough; the breakthrough test for lamellar shale oil is steadily promoted, and its success will have a revolutionary impact. The Member 9 of Yanchang Formation in northern Shaanxi area develops “Lijiapan shale”, and the risk exploration of shale oil is progressing smoothly. The exploration in Wulalike Formation in the southern section of the western margin of the basin has a good start, and new strata are exploited in the exploration of Paleozoic marine shale

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科技重大项目“鄂尔多斯盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1806)资助。
第一作者:刘显阳,男,1969 年 4 月生,2017 年获成都理工大学博士学位,现为中国石油长庆油田公司教授级高级工程师,主要从事油气地质勘探与综合研究,Email:lxys3_cq@petrochina.com.cn
通信作者:周新平,男,1984 年 9 月生,2013 年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油长庆油田公司高级工程师,主要从事页岩油综合研究工作,Email:zhxp13_cq@petrochina.com.cn

oil. (2) New oil enrichment areas are detected in the complex tectonic zone of Tianhuan depression and western margin thrust belt, forming three replacement areas: Yujialiang, West Huanxian, and North Pingliang, with the resource potential of more than 5×10^8 t. (3) New progress has been made in multi-strata and three-dimensional exploration in Sanbian areas, and the Haotan Integrated Demonstration Zone has been quickly built. The resource potential of Sanbian areas is preliminarily estimated as 5×10^8 t. (4) The lower assemblage of Yanchang Formation shows a good exploration prospect. Multiple favorable areas have been discovered through outstepping exploration in the Member 9 and 10 of Yanchang Formation, with the proven reserves of nearly 3×10^8 t. Overall, Ordos Basin is in the middle stage of exploration and still has great potential for increasing reserves. The new fields and types of oil exploration will provide replacement resources for oil companies to implement the important strategies of high-quality petroleum development.

Key words: Ordos Basin; new field; new type; shale oil; Tianhuan depression; western margin thrust belt; Sanbian areas; lower assemblage of Yanchang Formation

引用:刘显阳,李士祥,周新平,陈修,刘江艳,郭芪恒,魏嘉怡,廖永乐. 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.

Cite: LIU Xianyang, LI Shixiang, ZHOU Xinping, CHEN Xiu, LIU Jiangyan, GUO Qiheng, WEI Jiayi, LIAO Yongle. New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2070-2090.

油气作为主体能源地位在未来很长时间内不会发生根本改变^[1]。中国目前的油气供需形势日益严峻,石油对外依存度已然突破 70%^[2-3]。在当前复杂国际环境下,严重依赖进口的油气供给格局面临着运输通道安全的风险,加大中国油气的勘探开发力度是推进现代化建设、保障国家能源安全的迫切需要^[1]。近年来,中国石油长庆油田公司(长庆油田)立足鄂尔多斯盆地“三低”(低渗、低压、低丰度)油气藏实施勘探开发,取得了丰硕的成果。截至 2022 年底,在鄂尔多斯盆地长庆探区,石油累计探明地质储量达 68.3×10^8 t,连续 12 年新增石油探明储量超过 3×10^8 t;天然气累计探明储量达 6.86×10^{12} m³,连续 16 年新增探明地质储量超过 2000×10^8 m³;2022 年生产的油气当量突破 6500×10^4 t,为保障国家能源安全提供了强力支撑。

长庆油田高质量落实国家新一轮找矿突破战略行动,在陆相源内多层系、多类型页岩油新领域的风险勘探中不断突破^[4-6],在海相页岩油勘探中取得了重大发现^[7],在陆相源外以构造-岩性为主的常规油藏规模效益勘探中不断拓展^[8-9],石油勘探新领域的“常规、非常规并举”成为长庆油田 6000×10^4 t 以上增产稳产的重要战略布局。笔者系统梳理了鄂尔多斯盆地新领域石油的富集特征及资源潜力,以期对石油勘探规划、勘探开发部署等提供参考。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是在早元古代结晶基底上发育的多旋回大型叠合盆地,是中国内陆第 2 大沉积盆地。根据盆地现今的构造发育特征可将其划分为伊盟隆起、西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带和渭北隆起 6 个构造单元,总面积约为 37×10^4 km²,其中,伊陕斜坡

和天环坳陷是油气聚集的主要构造单元^[10](图 1)。

鄂尔多斯盆地的演化主要经历了中元古代—晚元古代坳拉谷盆地发育期、古生代稳定克拉通盆地发育期、中生代前陆盆地发育期和新生代周边断陷盆地发育期^[11-12]。中元古界长城系碎屑岩和蓟县系碳酸盐岩为发育在盆地结晶基底之上的一套沉积盖层,其后,在中元古代末期,由于蓟县运动使得古华北板块整体抬升,鄂尔多斯盆地缺失青白口系,仅在西南缘发育震旦系^[13]。早古生代,鄂尔多斯地块处于陆表海环境,沉积了以碳酸盐岩为主的寒武系和中—下奥陶统。中奥陶世末期,加里东运动造成了盆地全面抬升并经历了长达 140 Ma 的沉积间断与风化剥蚀,缺失志留系、泥盆系和下石炭统,形成奥陶系风化壳岩溶古地貌气藏^[14-15]。晚石炭世,华北海和祁连海分别从东、西两侧发生海侵,盆地持续沉降,沉积了海相和海陆交互相的上石炭统和下二叠统太原组、山西组煤系地层。中—晚二叠世,随着海水完全退出,鄂尔多斯盆地发育了内陆湖盆—三角洲沉积体系,广覆式生烃的煤系烃源岩与大面积分布的致密砂岩储层的相互叠置形成了上古生界致密砂岩气藏^[16-17]。晚中生代的印支运动结束了南海北陆的古构造格局,鄂尔多斯盆地进入独立演化阶段,为内陆断陷盆地,发育一套厚度约 1000 m 的以河流—湖泊相碎屑岩沉积为主的地层,其中,三叠系延长组自上而下依次划分为延长组 1 段(长 1 段)—延长组 10 段(长 10 段)共 10 段。延长组 7 段(长 7 段)沉积期是鄂尔多斯盆地的最大湖泛期,陇东地区整体沉积一套以富有机质页岩、暗色泥岩夹薄层粉砂—细砂岩为主的泥页岩层系,是盆地陆相页岩油勘探开发的主要层系,发现并探明了 10 亿吨级的庆城大油田;延长组 9 段(长 9 段)沉积期,甘泉—志丹地区发育一套页岩,具有有机质丰度较高、热演化程度适中、生烃潜力

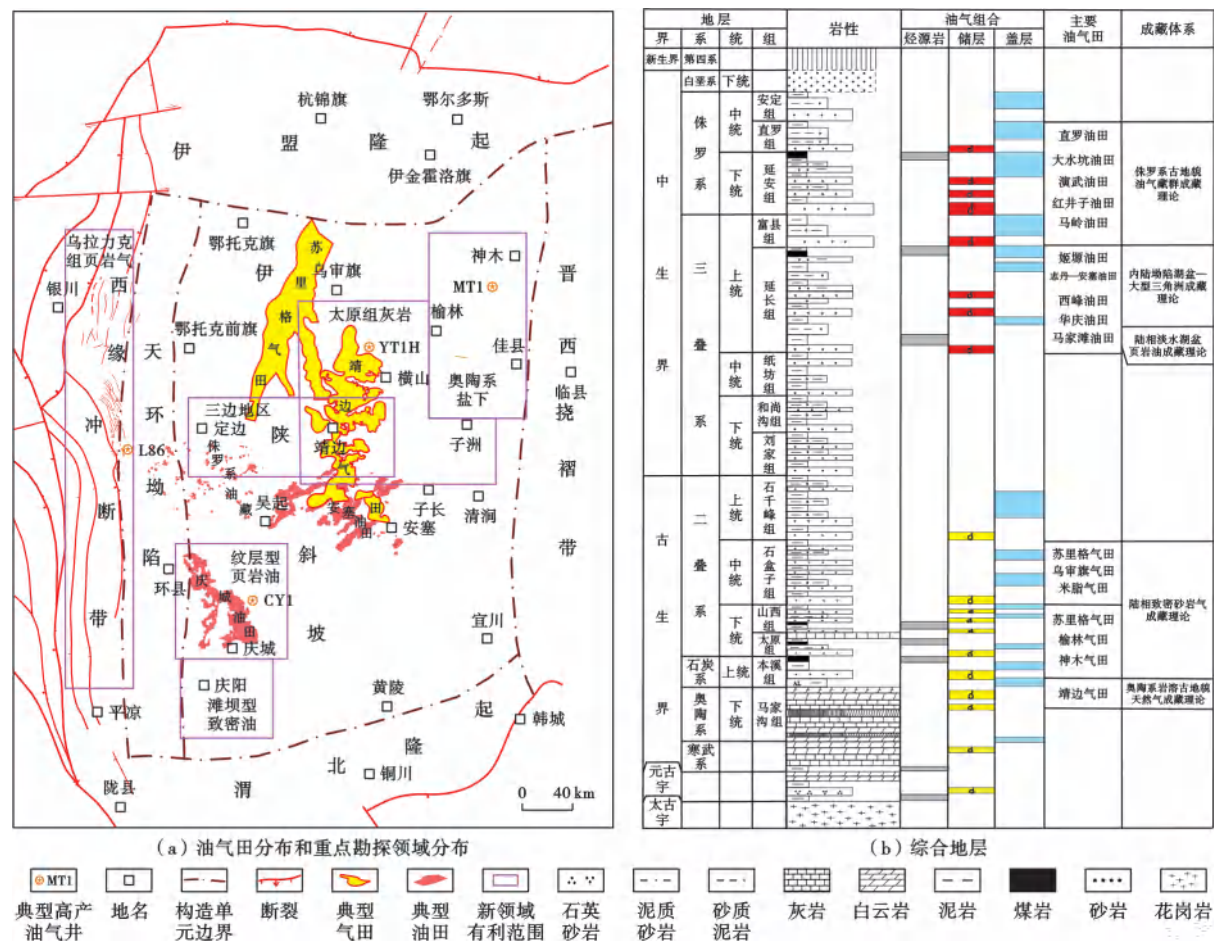


图1 鄂尔多斯盆地油气田和重点勘探新领域及综合地层特征(据文献[11]修改)

Fig.1 Distribution of oil-gas fields and key exploration fields,as well as comprehensive stratigraphic characteristics in Ordos Basin

好的烃源岩特征,是页岩油风险勘探的新领域^[18-19];长7段和长9段的烃源岩是中生界多层系油藏的主力烃源岩^[20]。印支运动末期,鄂尔多斯盆地再度隆升,延长组遭受长期侵蚀,形成沟谷纵横、残丘广布的古地貌,从而控制了侏罗系原油成藏^[9]。

鄂尔多斯盆地在纵向上具有“上油下气”的油气藏分布特点,发育两套含油层系(侏罗系延安组和三叠系延长组)、两套含气层系(上古生界碎屑岩和下古生界碳酸盐岩),是长庆油田的主要勘探开发目标^[21]。

2 石油勘探历程及资源情况

鄂尔多斯盆地的石油勘探始于20世纪初期,历经120余年的艰苦探索。进入21世纪以来,随着地质理论创新和关键技术进步,鄂尔多斯盆地不断获得大发现、大突破,推动了油田从持续稳产转入快速上产,成为中国重要的能源生产基地。期间,创新形成了侏罗系古地貌油藏群成藏理论、内陆坳陷湖盆建设性三角洲成藏理论、辫状河三角洲与湖盆中部砂质碎屑流成

藏理论,以及陆相淡水湖盆页岩油成藏理论,勘探对象从常规的构造油藏扩展到非常规的低渗透油藏、特低渗透油藏、致密油和页岩油,指导了侏罗系古地貌油藏、三叠系三角洲油藏、大型岩性油藏以及致密油、页岩油的勘探发现(图2),落实了姬塬地区、陕北地区、华庆地区、镇北—合水地区和页岩油5个10亿吨级含油富集区,夯实了油田公司可持续发展的资源基础。

“十三五”规划(2016—2020年)评价鄂尔多斯盆地石油资源量为 $169.0\times 10^8\text{t}$;截至2022年底,累计石油探明地质储量为 $105.2\times 10^8\text{t}$ (其中,长庆油田探区的石油资源量为 $113\times 10^8\text{t}$,累计探明地质储量为 $68.3\times 10^8\text{t}$)。勘探实践表明,随着地质理论的创新、工程技术的进步和勘探程度的提高,盆地资源量大幅度增加。目前,鄂尔多斯盆地的油气勘探总体处于中期阶段,石油资源量在页岩油、天环坳陷—西缘冲断带、三边地区(靖边—定边—安边)、延长组下组合等新领域、新类型方面仍具有较大的增长潜力。

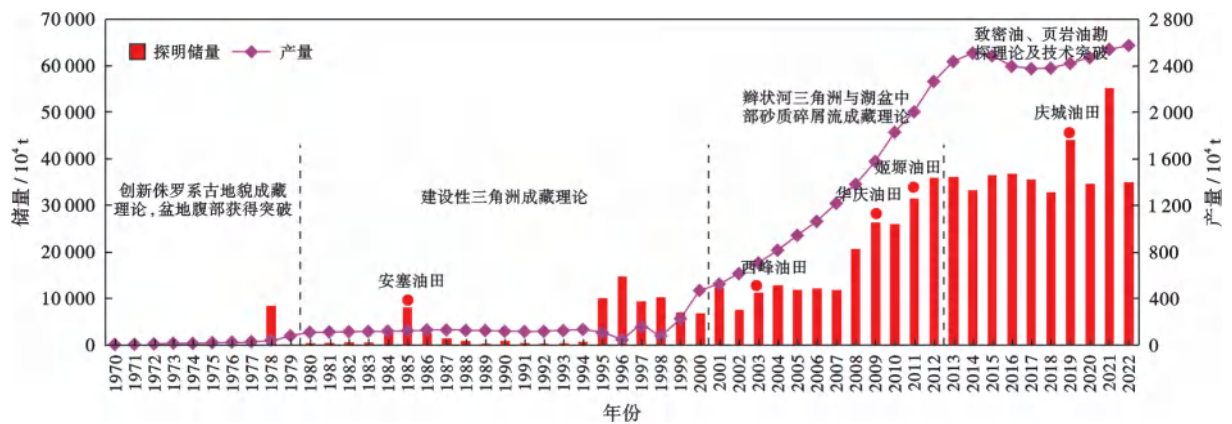


图 2 鄂尔多斯盆地石油勘探理论认识与勘探历程

Fig. 2 Theoretical understanding and exploration history of oil exploration in Ordos Basin

3 新领域、新类型的地质条件及勘探潜力

3.1 页岩油

鄂尔多斯盆地发育延长组的多套页岩层系,页岩油资源丰富,主要分布在中生界长 7 段(图 3)和长 9 段,古生界乌拉力克组也具有一定的勘探潜力。

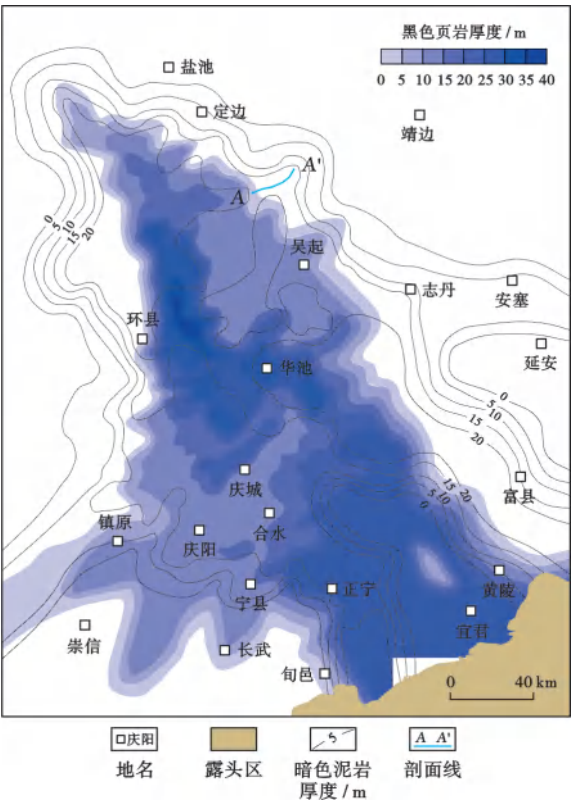


图 3 鄂尔多斯盆地长 7 段烃源岩厚度分布

Fig. 3 Thickness distribution of source rocks in the Member 7 of Yanchang Formation of Ordos Basin

3.1.1 长 7 段页岩油

根据沉积环境、岩性组合、源-储配置等特征,中国陆相页岩油可划分为夹层型、混积型、页岩型 3 大类。在此基础上,结合鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油的岩性

组合、相带分布和源-储配置的差异,将长 7 段页岩油划分为夹层型和页岩型两大类,其中,夹层型可细分为重力流夹层型和三角洲前缘夹层型,页岩型可细分为纹层型和页理型。

(1) 夹层型页岩油

主要分布在长 7 段 1 亚段和 2 亚段,夹持于富含有机质泥岩之间的薄层细砂岩是勘探开发的主要对象。重力流夹层型主要分布在盆地西南部的半深湖—深湖区,以庆城油田为代表,储层主要为多期砂质碎屑流、浊流成因的块状细砂岩,单砂体厚度一般小于 3 m。三角洲前缘夹层型主要分布在盆地东北部的陕北地区,储层以三角洲前缘水下分流河道砂体为主,单砂体厚度较大,一般为 4~6 m,砂体连续性好。夹层型页岩油具有如下主要特征:

① 烃源岩层系内优势储层大面积发育,源-储配置条件优越。

湖盆中部长 7 段发育黑色页岩和暗色泥岩两类烃源岩,黑色页岩的生油母质以湖生藻类为主,有机质类型主要为 I 型和 II₁ 型,有机质含量高,总有机碳(TOC)含量为 6.00%~26.00%,平均为 13.81%;暗色泥岩的有机质类型主要为 II₁ 型和 II₂ 型,有机质含量较高,TOC 含量为 2.00%~6.00%,平均为 3.75%^[22-23]。优质烃源岩的生烃总量约为 2 000×10⁸t,与半深湖—深湖重力流成因的砂体形成了源-储一体、自生自储的成藏组合,源-储配置条件优越,是夹层型页岩油规模富集的物质基础。

长 7 段沉积期,湖盆底形呈西陡东缓的不对称格局。盆地西南部陡倾,发育多期砂质碎屑流、浊流等重力流沉积;盆地东北部宽缓,三角洲前缘水下分流河道砂体是主要储集体。自长 7 段 3 亚段—长 7 段 1 亚段,随着基准面下降,三角洲及重力流沉积不断向湖盆中心进积,从湖盆边缘至湖盆中心依次发育水下分流河道、限制性水道、非限制性水道、前端朵体、堤岸沉积

和水道间或半深湖—深湖泥等沉积。限制性水道的延伸距离较短,在平面上主要呈聚拢状展布;非限制性水道的延伸距离较远,在平面上主要表现为分支状展布;

前端朵体主要发育在水道末端,呈片状或朵叶状分布,湖盆中部形成的叠置连片砂体是夹层型页岩油赋存的主要储层(图 4)。

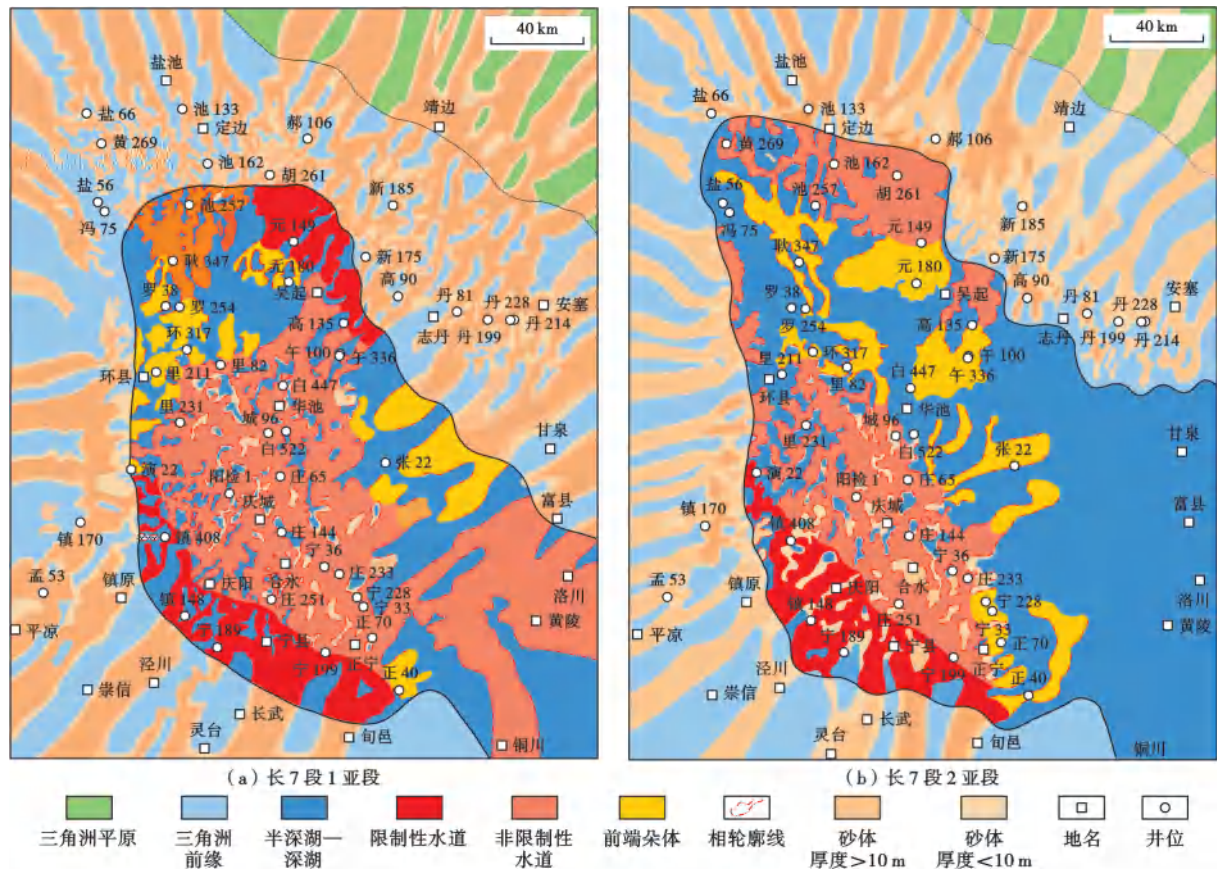


图 4 长 7 段 2 亚段—长 7 段 1 亚段沉积相及砂体展布

Fig. 4 Distribution of sedimentary facies and sand bodies from submember 2 to submember 1 of the Member 7 of Yanchang Formation

②储层中微米孔隙和纳米喉道数量众多,储集能力较强。

重力流夹层型页岩油的储层具有高石英(含量为 30%~45%)、低长石(含量小于 25%)的特征,主要发育溶孔和粒间孔(图 5),孔隙半径为 2~8 μm,喉道为 20~150 nm,微米孔隙和纳米孔喉全覆盖分布,数量众多,孔隙度为 8%~11%,渗透率为 0.05~0.3 mD。该类型页岩油主要位于湖盆中部的生烃中心,含油饱和度高达 70%~90%,原始气油比为 70~120 m³/t(生产气油比为 300 m³/t)。

三角洲前缘夹层型页岩油发育水下分流河道、席状砂等砂质储集体,储层具有高长石(含量为 40%~45%)、低石英(含量为 25%~30%)的特征,发育溶孔和粒间孔(图 6)等,孔隙度为 5%~10%,渗透率为 0.04~0.18 mD。该类型页岩油距离生烃中心相对较远,含油饱和度略低,分布在 60%~70%,原始气油比为 67~79 m³/t。

③“超富有机质供烃、微米—纳米孔喉共储、优势

层段富集”形成了源内高饱和度油藏。

成藏模拟实验表明,长 7 段的生-排烃表现为快速成藏和持续充注两个阶段^[2],高压充注为烃类的源内运移提供了动力,同时,烃源岩与砂岩的过剩压差分布在 8~16 MPa,高过剩压差是泥页岩中烃类优先向相邻物性较好的砂质夹层运移的重要动力。长 7 段砂岩夹层的烃类充注主要分为 3 个阶段,当成熟度较低时,泥页岩中以吸附烃为主,烃类未发生运移,随着有机质成熟度变高,泥页岩在饱和和吸附的基础上受生烃增压等作用影响,向邻近孔隙较发育的砂岩层运移,砂岩中的微米—纳米级孔喉形成了容留空间,并在持续充注过程中形成高饱和度油藏优势层段富集(图 7),表现出“超富有机质供烃、微米—纳米孔喉共储”的成藏特征。

陆相淡水湖盆页岩油成藏理论指导了长 7 段页岩油的勘探突破。湖盆中部地区和陕北地区落实夹层型页岩油有利区的面积近 1×10⁴ km²,储量规模达 40.5×10⁸ t,其中,重力流夹层型页岩油有利区的面积为 7 000 km²、储量规模为 30×10⁸ t,庆城油田累计提交探明储量

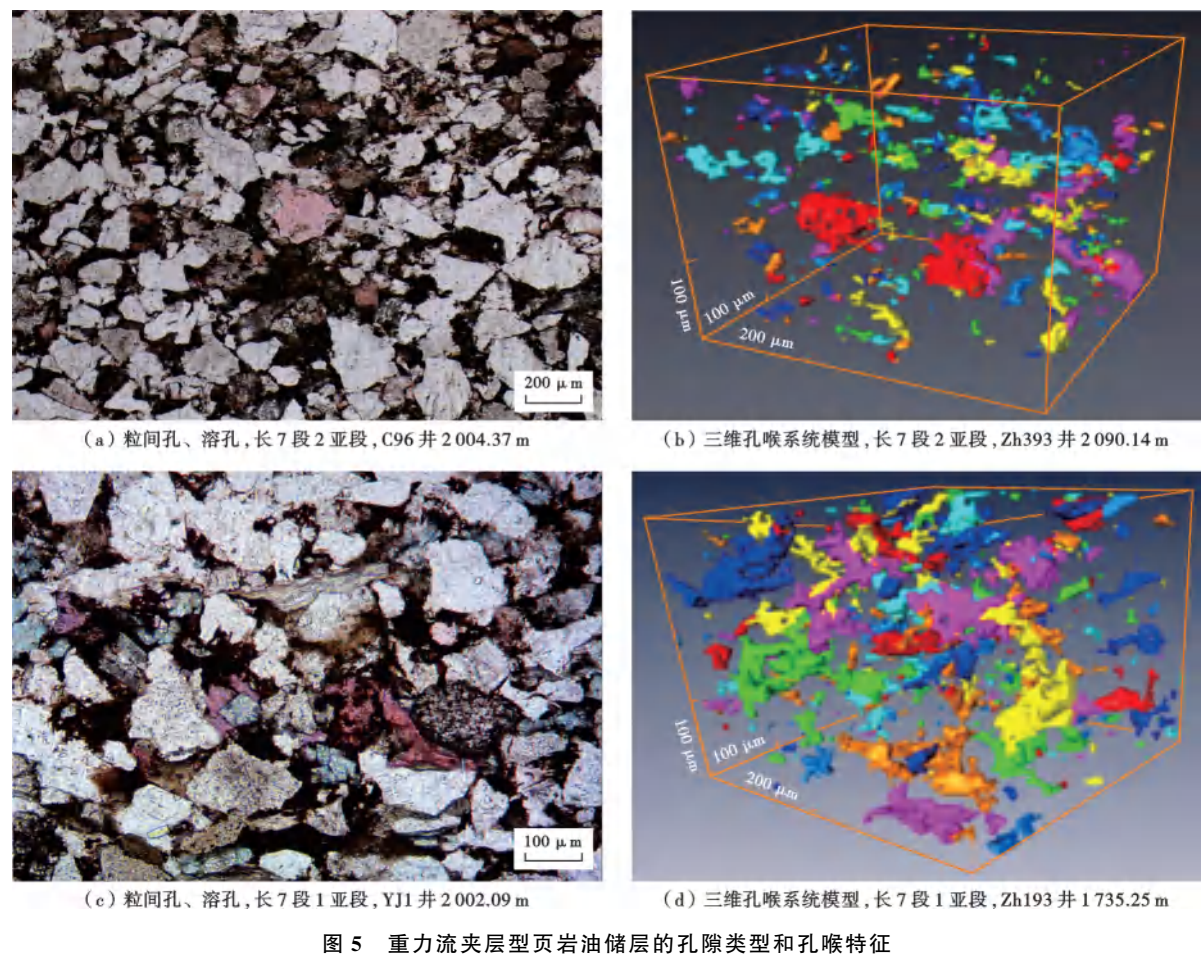


图 5 重力流夹层型页岩油储层的孔隙类型和孔喉特征

Fig. 5 Pore types and pore throat characteristics of gravity flow interlayered shale oil reservoir

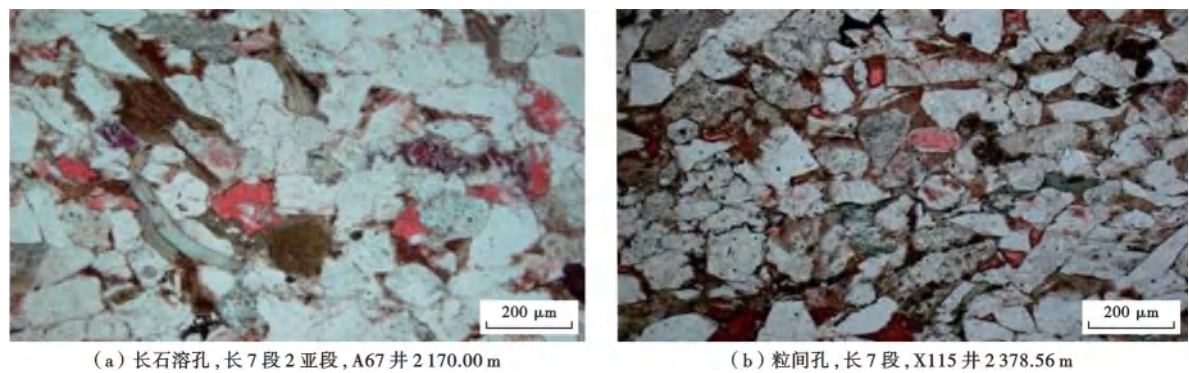


图 6 三角洲前缘夹层型页岩油储层的微观孔隙特征

Fig. 6 Micro-pore characteristics of delta front interlayered shale oil reservoir

11.54×10⁸t,陕北地区三角洲前缘夹层型页岩油有利区的面积为3000 km²、储量规模为10×10⁸t、已提交三级储量3.58×10⁸t。夹层型页岩油资源潜力巨大,通过水平井提产提效攻关,在庆城油田周边地区和陕北地区,夹层型页岩油可形成新的接替领域。

(2) 纹层型页岩油

主要分布在湖盆中部的长7段3亚段,发育粉砂岩—极细砂岩、泥岩、页岩和凝灰岩等细粒沉积复合体。纹层型页岩油在沉积环境、岩性组合特征、富集机

理方面均与夹层型存在差异。具有如下特征:

①发育具有纹层结构的细粒沉积复合体

延长组8段(长8段)—长7段沉积期,湖盆经历了快速沉降,其中,长7段3亚段沉积期,湖盆快速扩张,水体加深,陆源碎屑供给少,表现为典型的欠补偿沉积,湖盆中部主要发育一套细粒沉积。综合野外剖面、岩心、岩石薄片等分析结果认为,细粒沉积中主要发育砂质纹层、凝灰质纹层、低TOC含量泥质纹层、高TOC含量泥质纹层4种纹层类型(图8)。砂质纹

层主要呈灰色—灰白色,粒度整体较细,岩性以泥质粉砂岩、粉砂岩和极细砂岩为主,厚度薄,为 0.05~0.64 m,见波状层理和粒序层理;凝灰质纹层的岩性以灰白色—黄褐色凝灰岩和泥质凝灰岩为主,多与泥页岩呈薄互层状产出,显微观察中可见火山作用形成的玻屑或晶屑;低 TOC 含量泥质纹层的岩性以深灰色—黑色粉砂质泥岩或暗色泥岩为主,发育块状、水平层理,有机质含量较低(TOC 含量<6%);高 TOC 含量泥质纹层的岩性以深灰色—黑色页岩为主,页理发育,有机质含量较高(TOC 含量>6%),多夹毫米级凝灰岩。

天文周期、气候变化、地质事件综合控制了多类型细粒沉积的纹层形成。天文旋回分析揭示,超长偏心率周期控制着湖平面的变化与有机质的差异富集,是多类型纹层频繁叠置沉积序列组合形成的根本原因^[5]。长 7 段 3 亚段沉积期,鄂尔多斯盆地陡倾的西南部地形以及梅雨事件频发的古气候背景为洪水期异

重流的发育提供了有利条件,多期异重流事件导致深水区广泛发育以泥质粉砂岩—粉砂岩为主的砂质纹层组合。同时,多期火山活动携带的深部营养物质可促进藻类勃发,有利于富有机质泥页岩纹层及凝灰质纹层形成。

笔者通过环形水槽实验初步模拟了洪水期异重流搬运细粒泥沙的过程,并进一步阐述了纹层的形成机理。受密度差影响,泥沙进入安静水体后可沿底部进行远距离搬运。搬运初期形成的沉积,其下部较厚且粒度较粗,上部较薄且粒度偏细;随着继续搬运,滑水作用促使粒度较细的流体头部抬升并向前快速搬运,多个“新头部”的产生促使粉砂岩、泥质粉砂岩等更细粒沉积物搬运至更远的地方。细粒沉积物的切片照片(图 9)显示了多期砂质纹层与泥质纹层的组合序列,随着搬运距离的增大,可观测出的纹层数量逐渐减少,单个纹层的厚度逐渐减小。

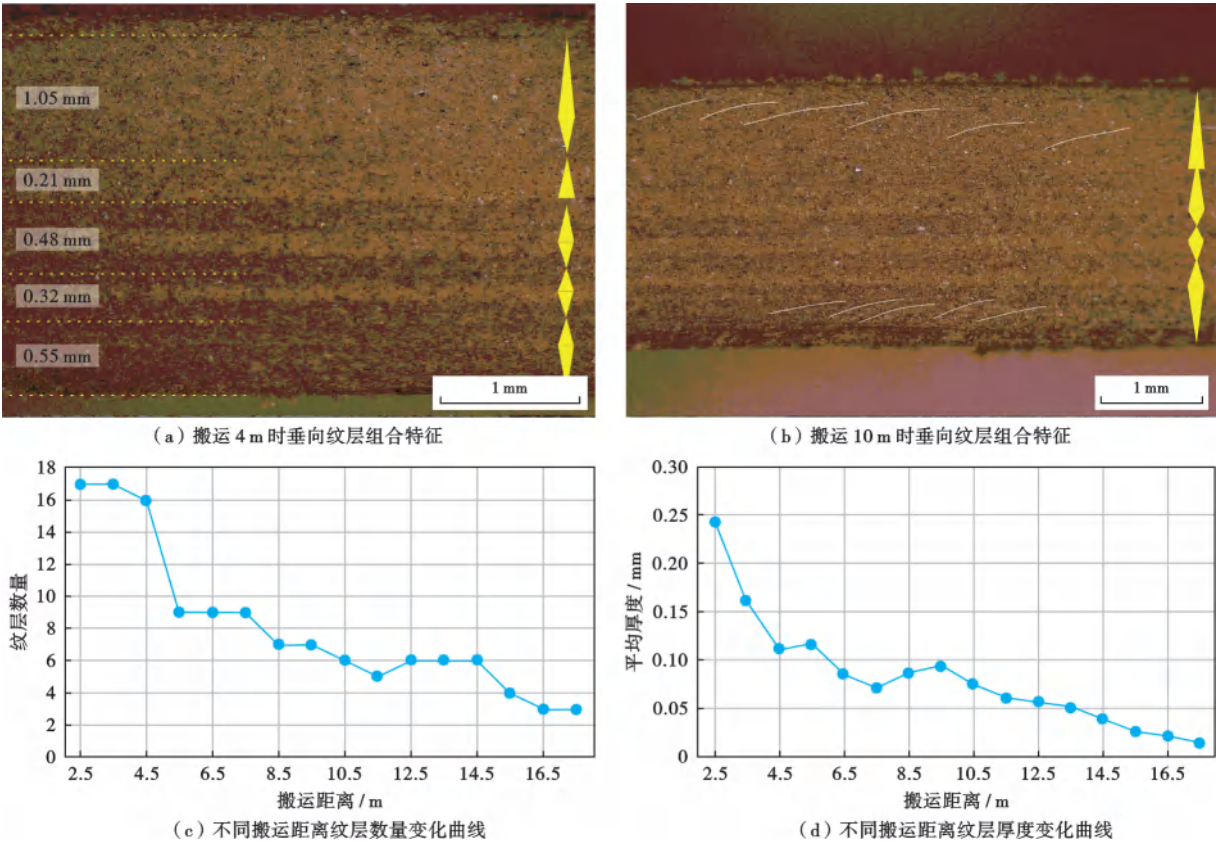


图 9 水槽模拟实验沉积物的纹层特征

Fig. 9 Laminar characteristics of sediments in the flume simulation experiment

②储集性能较好,原油性质好

垂向上,多类型纹层叠置形成了 3 种主要组合。主要表现为粉砂岩与中—低 TOC 含量泥页岩组合,岩性以极细砂、粉砂、页岩和泥岩为主,单层厚度为 1.0~60.0 cm,平均累积厚度为 15.3 m;凝灰质纹层组合的岩性

以凝灰岩为主,单层厚度为 0.1~5.0 cm,平均累积厚度为 0.6 m;高 TOC 含量泥页岩纹层组合以页岩为主,单层厚度为 0.5~10 cm。砂质纹层与中—低 TOC 含量泥质纹层的长英质含量高,可压性好,孔隙半径为 1~5 μm,喉道半径为 10~90 nm,平均孔隙度为 6.11%,渗透率为 0.07 mD。

从含油性看,砂质纹层中荧光特征明显,以轻质油为主,主要赋存于粒间孔和溶蚀孔中(图 10);凝灰质纹层和高 TOC 含量泥质纹层中油质相对较重,主要分布在微裂缝、溶蚀孔和层理缝中(图 11)。砂质纹层中的烃类以饱和烃

为主,轻质组分占 73%,原油性质好;凝灰质纹层中的烃类以饱和烃和非烃为主,轻质组分占 63%;高 TOC 含量泥质纹层中的烃类以非烃、饱和烃和芳香烃为主,轻质组分占 55%,原油性质相对较差。

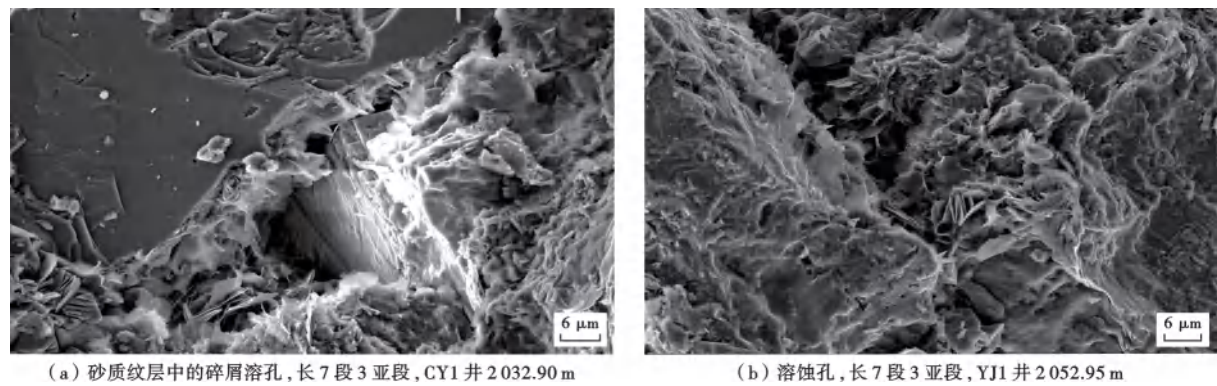


图 10 砂岩纹层中的微观孔隙特征

Fig. 10 Micro-pore characteristics in sandstone lamellae

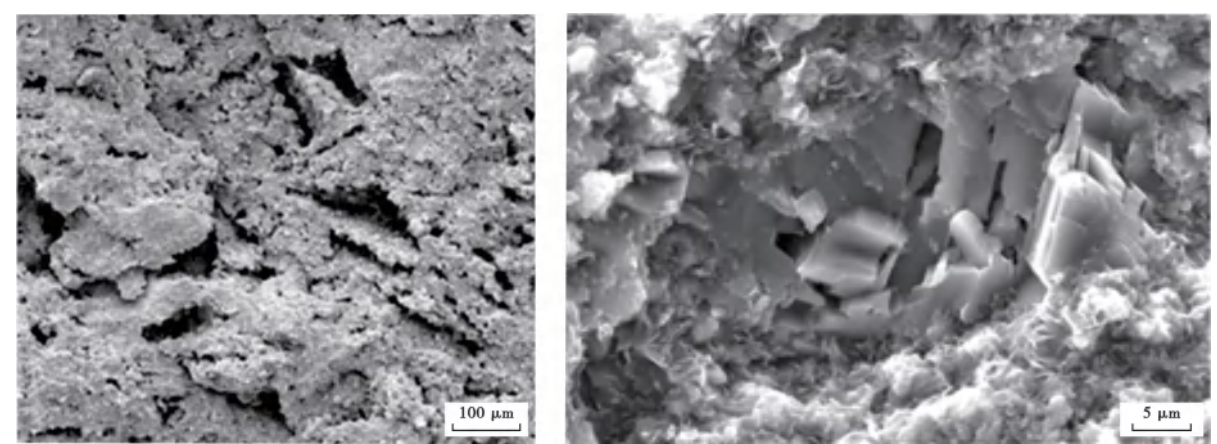


图 11 凝灰质纹层中的微观孔隙特征

Fig. 11 Micro-pore characteristics in tuff lamellae

2011 年以来,针对长 7 段 3 亚段纹层型页岩油,长庆油田有 13 口直井在压裂后获得了工业油流,突破了出油关,但试采效果并不理想。2019 年,长庆油田在湖盆中部部署了 CY1 井和 CY2 井两口风险探井,开展了“水平井+体积压裂”试验,试油后均获得百吨高产;2021 年,部署实施的 LY1H 井在试油中获得了 116.8 t/d 的高产油流,试采 500 余天,累积产油量超过 8 000 t,目前的产油量仍超过 10 t/d,展现出良好的稳产能力。2022 年,长庆油田针对纹层型页岩油提交预测地质储量 2.05×10^8 t,预计资源潜力为 20×10^8 t。

(3) 页理型页岩油

根据有机质成熟度的大小可分为中—高成熟度和中—低成熟度页理型页岩油。

中—高成熟度页理型页岩油指烃类滞留在镜质体反射率(R_o)大于 0.8% 的富有机质页岩中的页岩油类型。其“甜点”为页理及纹层频繁发育、脆性矿物含量较高的

黑色页岩[图 12(a)、图 12(b)]。页岩的氦气吸附测定的孔隙度可达 6%,脉冲渗透率可达 0.04 mD;受黑色页岩中水平页理缝及陆源长英质、凝灰质等相对高孔渗性纹层的复合影响,页岩的水平渗透率普遍高于垂直渗透率。该类页岩油的储集空间以刚性矿物支撑的粒间孔、粒内溶蚀孔、黏土矿物晶间孔及黄铁矿晶间孔为主,页理缝和超压微裂缝也发育频繁[图 12(c)—图 12(e)]。烃类的源内微运移是控制中—高成熟度页理型页岩油差异富集的主要因素,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 含量相对高孔渗刚性纹层聚烃的特点^[24]。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呈明暗相间[图 12(f)],其中,油质沥青主要赋存在长英质纹层和凝灰质纹层中,胶质沥青则主要赋存在有机质纹层和黏土质纹层中,这是微运移过程中有机质纹层和黏土矿物纹层吸附了非烃、沥青质等运移能力弱的极性组分的结果^[25]。

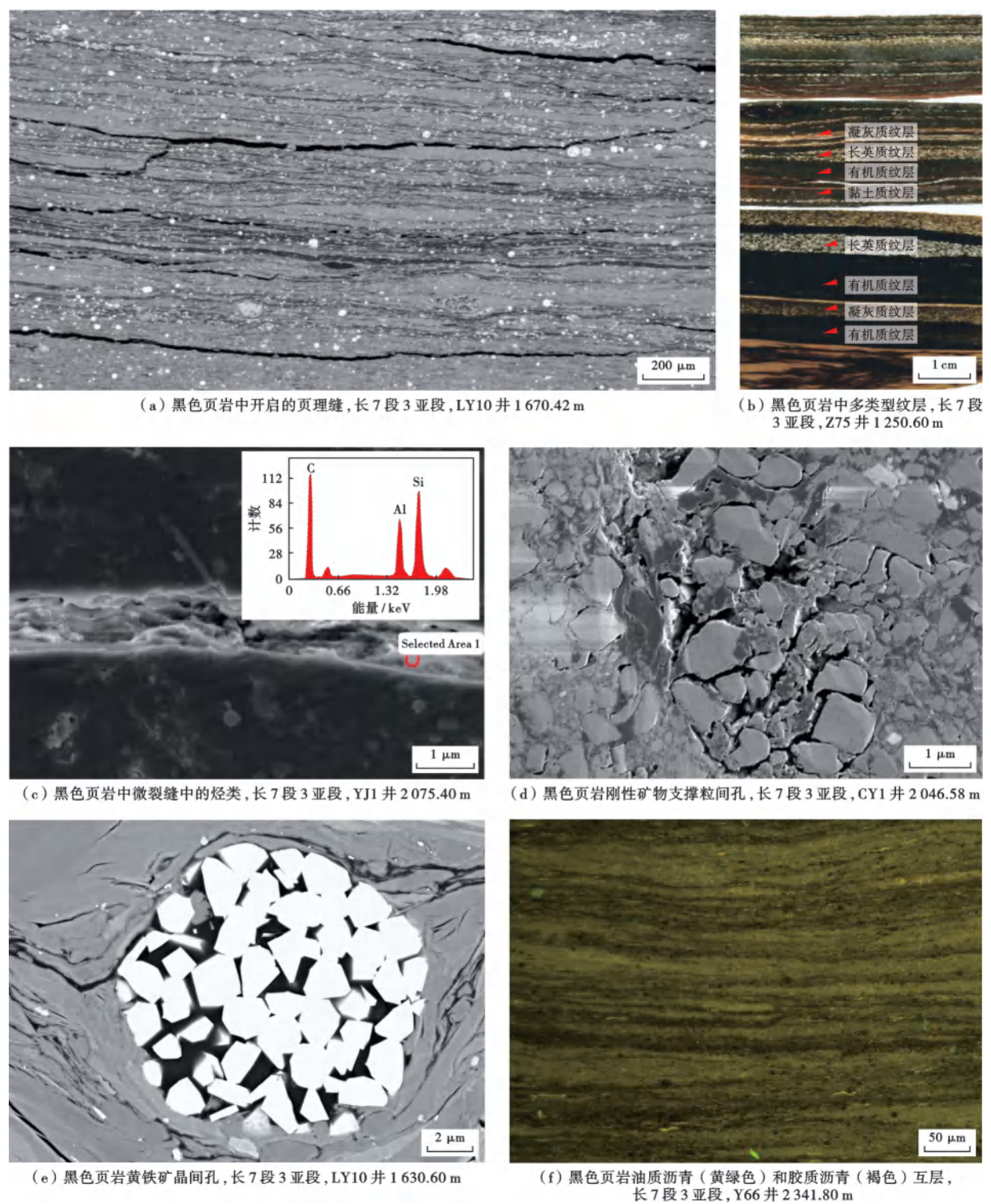


图 12 鄂尔多斯盆地页理性页岩油储层特征

Fig. 12 Characteristics of lamellation of shale oil reservoir in Ordos basin

目前,长庆油田已有 7 口直井在长 7 段 3 亚段页岩中试油获得 10 t/d 以上的工业油流,表明在长 7 段 3 亚段中,中—高成熟度页理型页岩油的含油性较好,水平井开发提产的潜力大。初步估算,中—高成熟度页理型页岩油的可动烃资源量为 60×10^8 t,资源丰富,前景广阔。纯泥页岩段的原油以轻质—中质组分为主,原油密度平均为 0.84 g/cm³,黏度平均为 5.9 mPa·s,凝

固点为 19 ℃;原油中的沥青 + 非烃含量低,平均为 8.44%,而烃类以饱和烃和芳香烃为主;页岩的平均含气量为 1~3 m³/t,高含气量及高原油品质提高了页岩油的流动性。根据黑色页岩的沉积厚度和有机质热演化程度,平面上可在鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段划分出马岭—华池(I 类)、环县—姬塬(II 类)、正宁—旬邑(III 类)3 个深洼区^[25](图 13)。I 类深洼区的 R_o 值

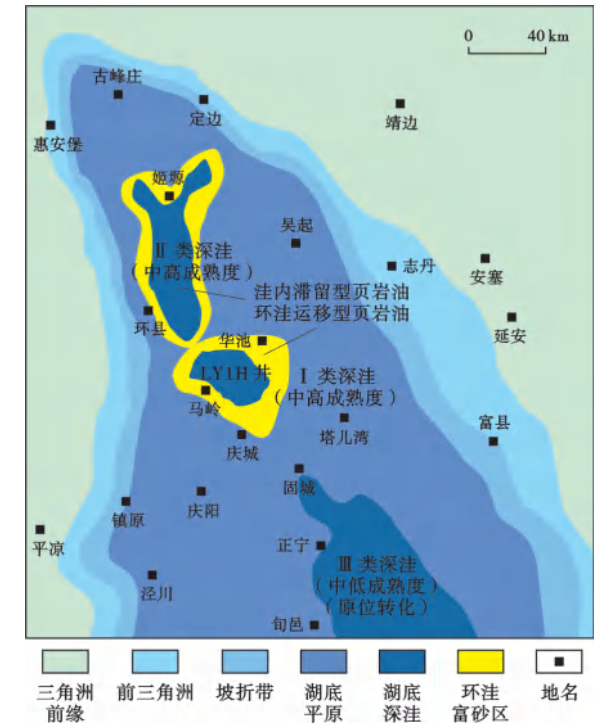


图 13 长 7 段 3 亚段古地形单元及页理型页岩油勘探区域
Fig. 13 Paleotopographic units and lamellar shale oil exploration area of the submember 3 of Member 3 of Yanchang Formation

大于 0.9%, TOC 含量大于 16%, 黑色页岩的平均厚度为 23 m。围绕有机质成熟度相对较高的、保存条件较好的马岭—华池 (I 类) 深洼区找油, 是中—高成熟

度滞留型页岩油风险勘探的主要方向。
中—低成熟度页理型页岩油指烃类滞留在 R_o 小于 0.8% 的富有机质页岩中的页岩油类型。其烃类在微观黏土质纹层—有机质纹层中原位滞留的固态烃为主, 常规压裂改造难以实现商业开发, 主要采取原位加热转化实现资源的有效开发。
鄂尔多斯盆地长 7 段 3 亚段页岩有超过 50% 的有机质尚未转化成石油烃, 基于原位转化技术的可采资源量为 $(400 \sim 450) \times 10^8 \text{ t}$, 资源潜力巨大^[26-28]。在盆地东南部的正宁—旬邑深洼区, 埋深浅 ($< 1500 \text{ m}$)、有机质成熟度低 ($R_o < 0.8\%$)、页岩含水率小 ($< 0.3\%$), 原位转化的有利区面积大于 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 已开展先导试验攻关。III 类深洼区的 R_o 值小于 0.8%、TOC 含量大于 10%、黑色页岩的平均厚度为 22 m, 是中—低成熟度页理型页岩油的有利区。中—低成熟度页理型页岩油如若获得突破, 将带来原油产量革命性增长, 对改善中国油气安全供应形势意义重大。

3.1.2 长 9 段页岩油

鄂尔多斯盆地在进入长 9 段沉积期后, 随着基底快速下沉, 发生了一次大规模湖侵, 水体加深, 湖盆范围增大, 湖盆底形呈西陡东缓的不对称拗陷^[29], 其中, 志丹—甘泉地区水体较深 (图 14), 沉积了一套厚度最大可达 20 m 以上的“李家畔”泥页岩, 是延长组下组合重要的烃源岩^[19,30]。目前, 长庆油田在志丹地区部署

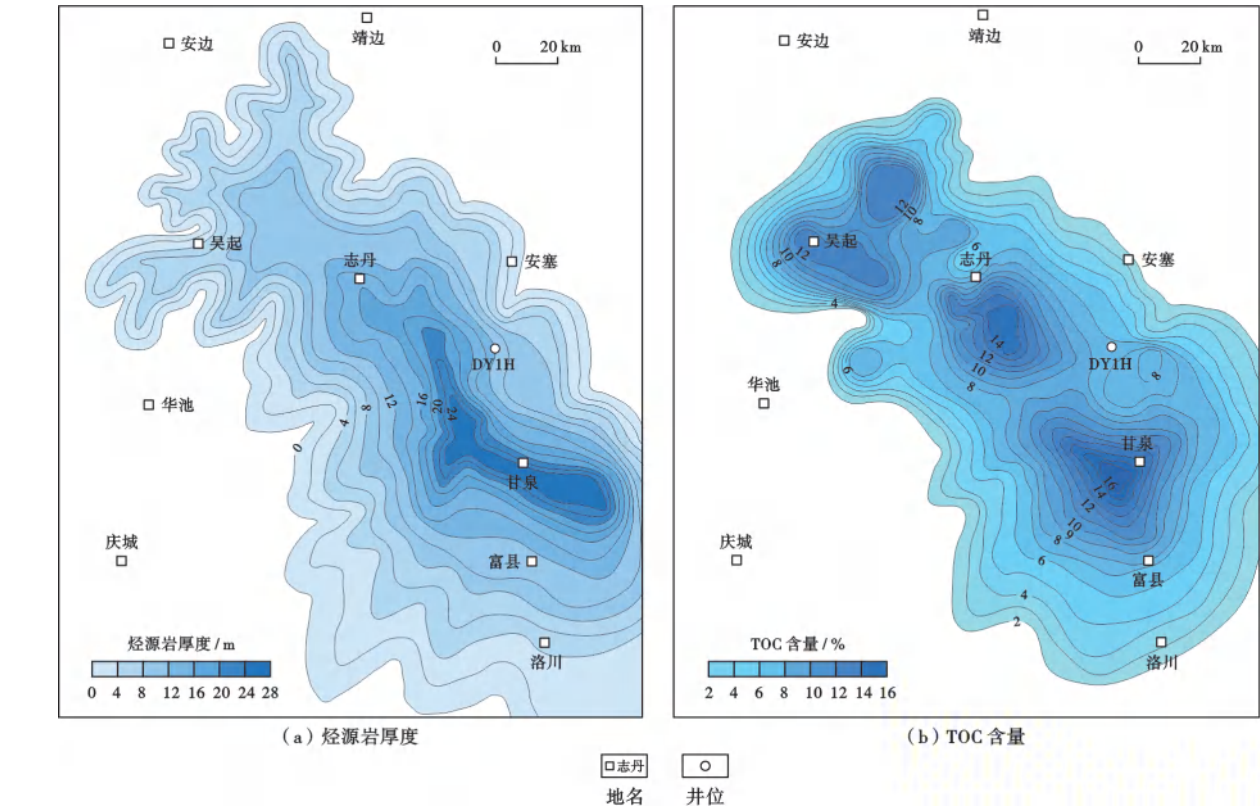


图 14 鄂尔多斯盆地长 9 段烃源岩厚度及 TOC 含量分布
Fig. 14 Source rock thickness and TOC content distribution of the Member 9 of Yanchang Formation in Ordos Basin

了一口风险探井——DY1H 井,攻关评价长 9 段页岩油的资源潜力。

长 9 段泥页岩的有机质类型主要为 I 型和 II₁ 型, TOC 含量为 0.5%~19.5%、平均为 3.7%,岩石热解烃(S₁)主要分布在 1.2~7.7 mg/g、平均为 3.1 mg/g, R_o 为 0.8%~1.3%,处于成熟—高成熟阶段,有利于大量生烃,整体属于好—优质烃源岩。DY1H 导眼井的岩心显示,在长 9 段顶部的富有机质泥页岩内发育多期粉砂质、凝灰质夹层,其单层厚度为 0.2~2.0 m,砂地比约为 15%。砂质夹层与页岩均有较好的含油

显示。砂质夹层中原油外渗明显,二维核磁共振解释的孔隙度为 10.3%,含油饱和度为 16%~47%,可动油饱和度平均为 29.5%;黑色页岩累计厚度为 8.5 m, S₁ 平均为 6.3 mg/g,二维核磁共振解释的孔隙度为 5.6%,含油饱和度为 5%~41%,可动油饱和度平均为 21.7%。孔隙类型主要包括原生粒间孔、粒间溶蚀孔、晶间孔和有机质孔[图 15(a)—图 15(c)],整体以孔径大于 20 nm 的介孔和宏孔作为有效的储集空间。

长 9 段泥页岩整体表现为有机质丰度高、成熟度适中、孔隙类型多样、分布范围广的特征,厚层泥页岩

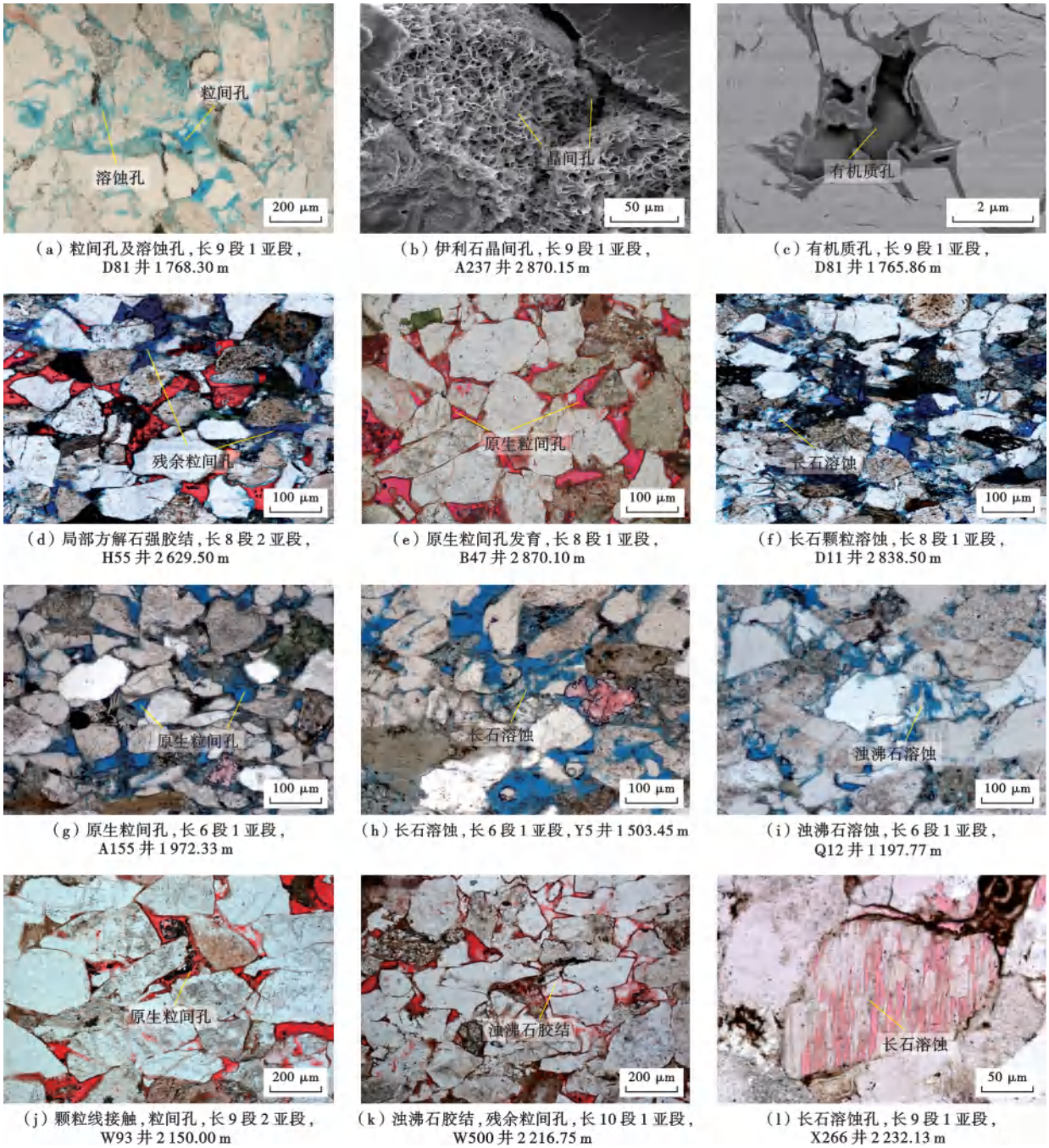


图 15 鄂尔多斯盆地延长组储层的微观特征

Fig. 15 Microscopic characteristics of Yanchang Formation reservoir in Ordos Basin

夹薄层粉砂岩复合体整体具有良好的生烃及储集能力,具备页岩油富集的有利地质条件。根据长 9 段泥页岩的厚度及平面分布,结合成藏特征及主控因素,利用热解法、抽提法和面积资源丰度类比法,初步计算长 9 段页岩油的资源量约为 $27 \times 10^8 \text{ t}$,这是继长 7 段页岩油之后又一重要勘探领域。

3.1.3 古生界乌拉力克组海相页岩油

2022 年 6 月,针对鄂尔多斯盆地西缘南段中奥陶统海相页岩,长庆油田实施的 YT3 井在乌拉力克组试油获得 5.3 t/d 的工业油流。YT3 井是一口古生界工业油流井,拉开了华北地区古生界油藏勘探的序幕,开拓了页岩油勘探的新层系。

鄂尔多斯盆地西缘在早古生代位于祁连海与华北地块交接处,属于祁连海沉积区^[31-32]。加里东运动使得鄂尔多斯盆地东部抬升为陆,水体“西深东浅”,发育斜坡—广海陆棚—盆地相沉积体系。盆地西缘南段的钻井揭示,乌拉力克组现今的地层厚度为 10~150 m(图 16),局部因受断裂影响而重复,厚度可达 365 m。地层厚度整体呈“西厚东薄、北厚南薄”的特征^[33]。

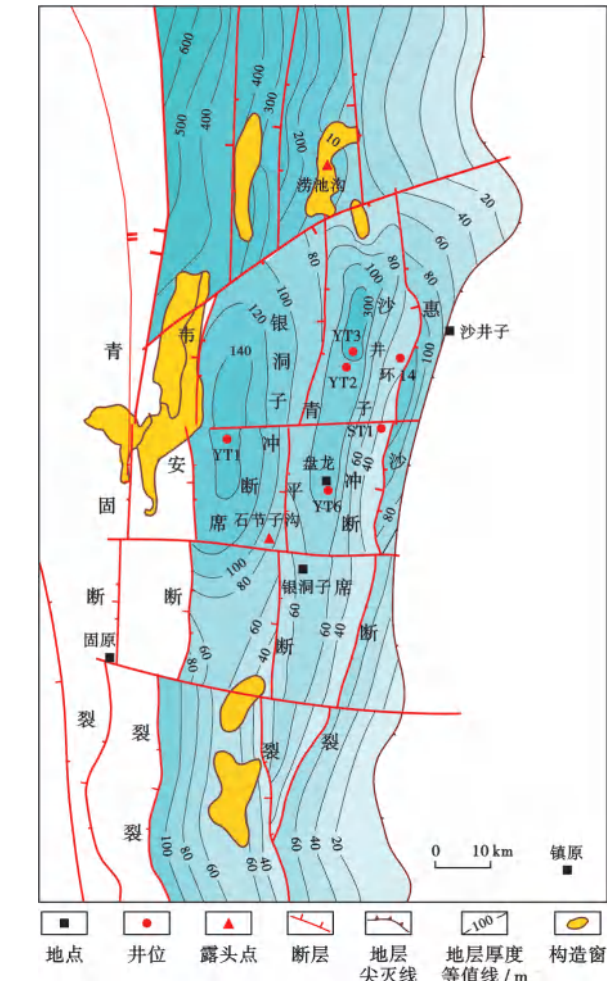


图 16 鄂尔多斯盆地西缘冲断带南段乌拉力克组地层厚度
Fig. 16 Thickness of Wulalike Formation in the southern thrust belt in western margin of Ordos Basin

在鄂尔多斯盆地西缘南段,乌拉力克组发育硅质斜坡相有利沉积微相,岩性以灰黑色泥页岩为主,富含笔石,硅质含量高,是良好的烃源岩层。硅质页岩的孔隙类型以粒内溶孔、晶间孔、有机质孔和残余孔缝为主。页岩中含有石英、长石、方解石和白云石碎屑,碎屑一般较粗大,少部分碎屑经溶蚀后产生粒内溶孔[图 17(a)、图 17(b)];自生微晶石英中可见晶间微孔[图 17(c)];硅质页岩中可见有机质孔[图 17(d)];部分硅质页岩中可见莓球状黄铁矿,黄铁矿中发育残余微孔缝[图 17(e)]。乌拉力克组为源-储一体,形成自生自储式油藏类型,初步圈定的有利勘探面积为 1 000 km²。此外,乌拉力克组的油可通过断裂系统向上运移到羊虎沟组砂岩中储存。羊虎沟组含油储层的岩石类型以石英砂岩为主,孔隙类型主要为粒间孔[图 17(f)、粒间(内)溶孔[图 17(g)、图 17(h)]以及晶间孔[图 17(i)],物性较好,与乌拉力克组形成下生上储式油藏类型。羊虎沟组初步圈定的有利勘探面积为 100 km²。

在鄂尔多斯盆地西缘冲断带南段,从西向东依次发育银洞子冲断席和沙井子冲断席。近几年的勘探表明,受构造运动影响,两个冲断席的烃源岩成熟度差异较大,导致油气相态不同。银洞子冲断席以生气为主,沙井子冲断席以生油为主。银探 3 井位于沙井子冲断席上。沙井子冲断席的古生界发育较全,上覆地层发育,保存条件好,勘探潜力大,估算生油潜力为 $1.0 \times 10^8 \text{ t}$,有望成为油气勘探的重要领域。

3.2 天环坳陷—西缘冲断带

近年来,天环坳陷—西缘冲断带复杂区勘探不断获得新突破,形成了于家梁、环县西、平凉北 3 大接替领域。天环坳陷位于鄂尔多斯盆地西缘,构造复杂,在印支期上三叠统的断裂系统开始形成,在燕山期—喜马拉雅期挤压作用造成走滑断裂及局部隆起^[34-36]。三叠纪末期,天环坳陷—西缘冲断带的构造呈西高东低,受印支期—燕山期—喜马拉雅期 3 期构造影响,到侏罗纪末期,天环坳陷轴部基本形成,呈现出西低东高的分布状态^[37-38]。

3.2.1 烃源岩特征

盆地西部高密度钻井显示,长 7 段沉积期发育小型湖湾,导致长 7 段底部发育了厚度一般小于 15 m 的灰黑色富有机质泥页岩。该套泥页岩的有机质类型以 II₁ 型和 II₂ 型为主,有机碳含量平均为 3.59%,R_o 主要介于 0.41%~0.97%,处于低成熟—成熟阶段,生烃潜量(S₁ + S₂)平均为 14.67 mg/g,整体属于优质烃源岩。油源对比结果表明,长 8 段原油与本地长 7 段烃源岩的地球化学指标差别较大(图 18),该区长 8 段原油极大可能来自盆地内部生烃能力更强的长 7 段烃源岩。

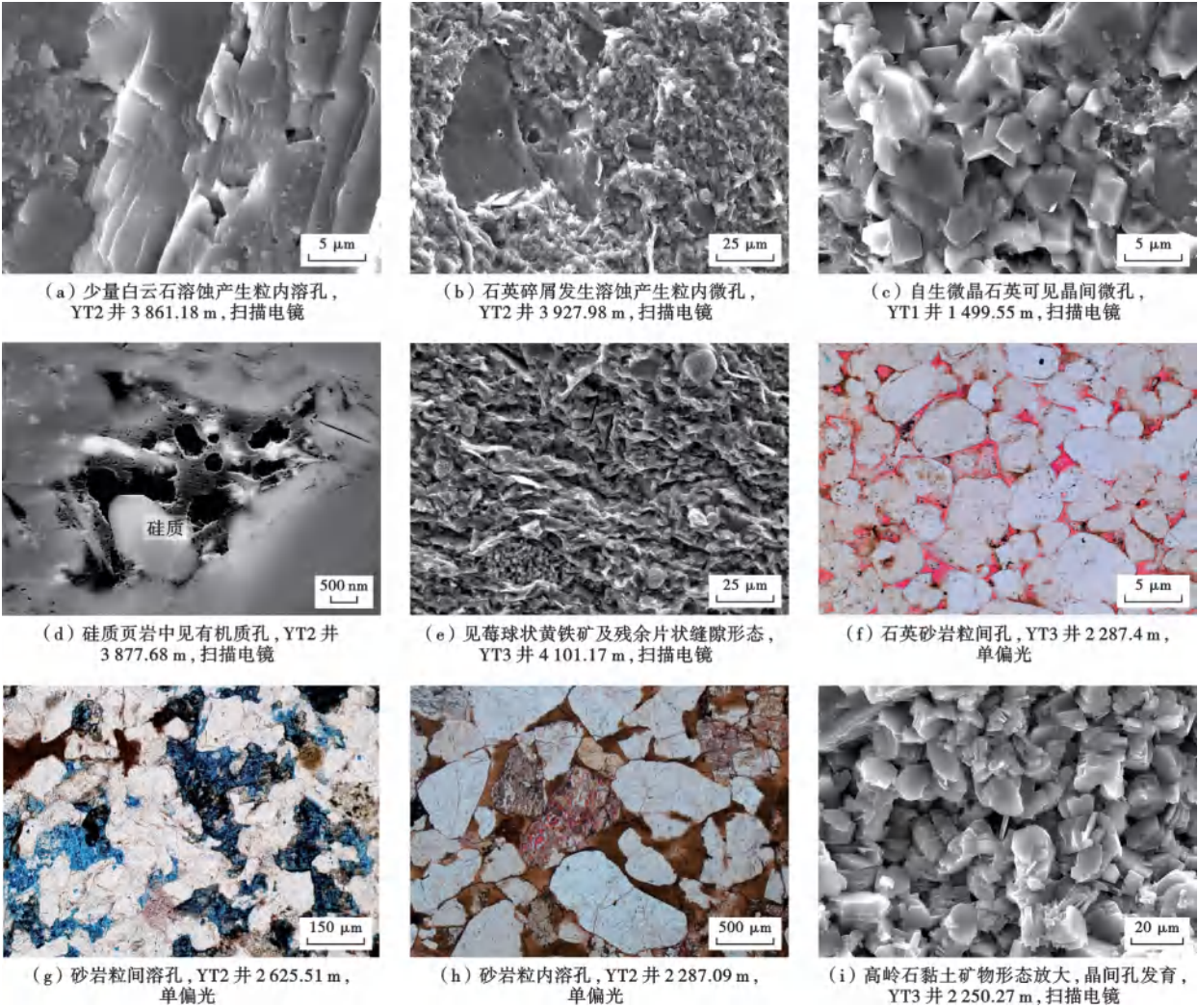


图 17 鄂尔多斯盆地西缘南段含油储层的储集空间特征

Fig. 17 Reservoir space characteristics of oil-bearing reservoirs in the southern section of the western margin of Ordos Basin

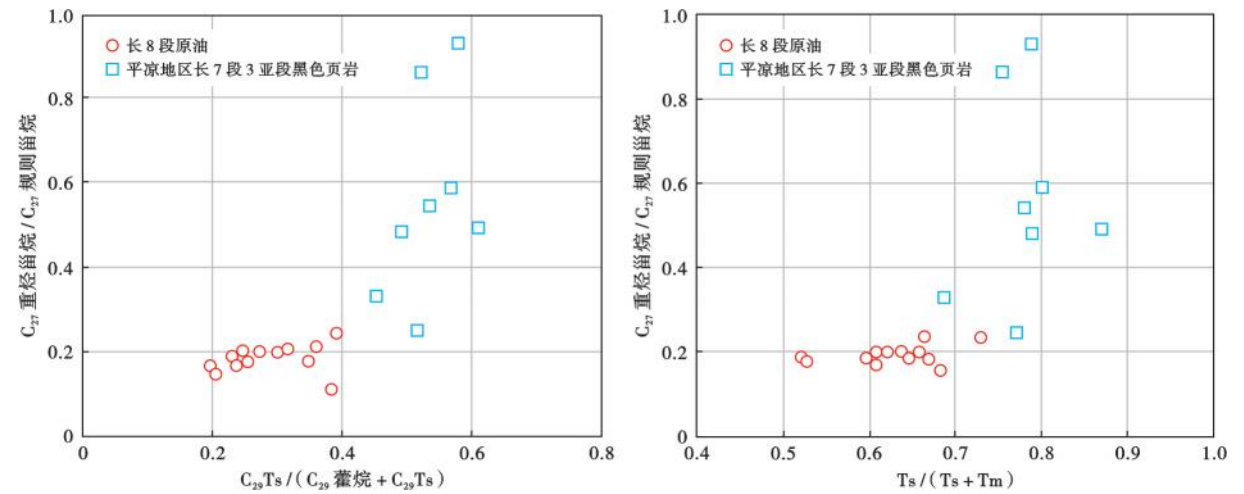


图 18 天环地区烃源岩及长 8 段原油的地球化学特征

Fig. 18 Geochemical characteristics of source rocks and crude oil of the Member 8 of Yanchang Formation in Tianhuan area

3.2.2 储层特征

长 8 段是盆地西缘主要的含油层之一,储集层厚度大,砂体分布稳定。长 8 段沉积期,盆地西部构造相对稳定,发育大规模的辫状河三角洲平原沉积^[29,39],多期辫状河道和心滩坝在纵向上叠置,单期河道砂体的厚度可达 8~16 m,河道宽度为 3~9 km,分布范围广。长 8 段储层中长石含量高,岩性以岩屑长石砂岩为主,胶结作用普遍,可见较强的铁方解石和绿泥石胶结,储集空间以粒间孔和溶蚀孔为主[图 15(d)—图 15(f)]。碳酸盐胶结物的存在极大地破坏了原生粒间孔隙,绿泥石常以包壳的形式形成于颗粒表面,这在一定程度上抑制了压实作用,但较高含量的黏土矿物堵塞吼道会对孔隙连通性影响较大。受此影响,储层孔隙度主要介于 8.0%~16.0%、平均为 12.9%,渗透率主要介于 0.06~18.00 mD、平均为 2.30 mD,孔喉连通性较差,储层整体致密。

3.2.3 成藏特征

长 8 段储层的流体包裹体均一温度主要分布在 60~140 ℃,存在 85~100 ℃、110~130 ℃ 两个峰值区间,揭示了两期烃类充注。结合古埋藏史分析认为,油气早期充注时间在晚侏罗世,晚期充注峰值在早白垩世,且晚期充注强度要强于早期充注。K-Ar 测年显示成藏时间主要在 125~135 Ma,也进一步证实油气充注时间主要在早白垩世。天环地区烃源岩的生烃能力弱,原油主要来自于本地长 7 段优质烃源岩,原油沿高渗砂体、断层等优势运移通道在相对优质的储层中形成了非均一充注。长 7 段烃源岩生成的油气在古构造影响下逐渐向天环坳陷高部位运移聚集,后期受西缘冲断带构造抬升作用影响,油藏发生调整,由岩性油藏转变为现今的构造-岩性油藏,形成多个有利圈闭(图 19)。

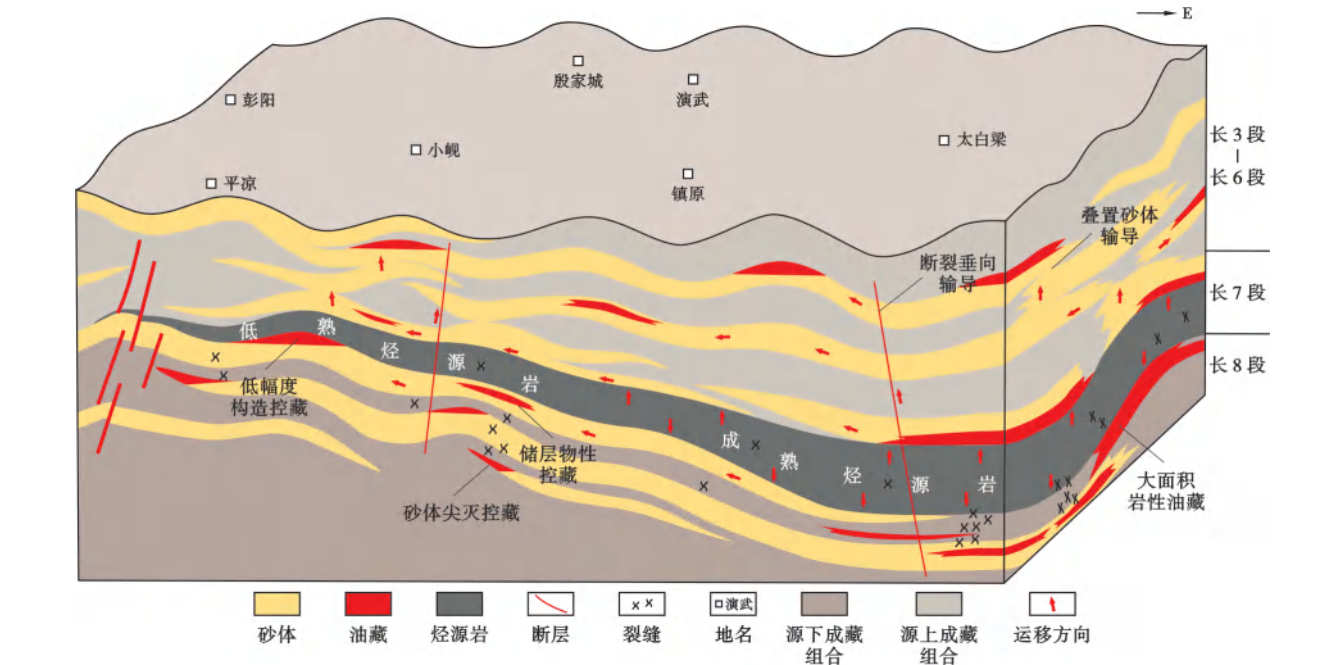


图 19 平凉—演武地区油气成藏模式(据文献[40]修改)
Fig. 19 Hydrocarbon accumulation model in Pingliang-Yanwu area

随着三维地震资料完善及解释处理技术提升,天环坳陷复杂构造区有利圈闭识别与预测的准确率不断提高,目前已落实长 8 段和长 4+5 段两套主力油层,估算资源量超过 5×10⁸ t。

3.3 三边地区

三边地区位于陕北地区东北部,构造位置处于盆地的伊陕斜坡,面积约为 8 000 km²。2021 年以来,长庆油田通过在区域探井中开展中生界复查和三维地震重新处理,深化了烃源岩、输导机理、古地貌等综合研究,落实了多个规模储量区,在中部郝滩地区勘探取得了突破,建成了郝滩一体化示范区。

3.3.1 烃源岩特征

长 7 段烃源岩厚度由湖盆中心向周缘地区逐渐减小,在三边地区已减薄至约 5 m。三边地区长 7 段烃源岩的有机质类型均以 I—II 型为主,TOC 含量主要分布在 1.48%~3.38%,S₁+S₂ 分布在 2.55~17.24 mg/g,R_o 主要为 0.87%~0.93%,最高热解峰温(T_{max})分布在 445~451 ℃,整体属于中等—差烃源岩,生烃能力较差。通过生物标志化合物对比,三边地区的原油特征与盆地内部优质烃源岩的特征相似,推断该区的原油主要为远距离侧向运移聚集而成。

3.3.2 储层特征

三边地区的储层整体受东北物源控制,主要发育曲流河三角洲前缘水下分流河道砂体,局部发育河口坝砂体,多期河道叠置,岩性以细砂岩为主,夹薄层粉砂岩。砂岩的厚度一般分布在 8~17 m,在平面上呈连片分布。油层主要受水下分流河道砂体控制,发育长 7 段、延长组 6 段(长 6 段)两套主力含油层段,而主砂带两侧发育的分流间湾泥质沉积可形成侧向遮挡的隔夹层。受东北物源影响,三边地区延长组的矿物组成表现为“高长石、低石英”的特征,胶结物主要为方解石和浊沸石,胶结作用在水动力较弱的河道侧翼发育明显,强碳酸盐胶结导致粒间孔损失严重。同时,由于整体粒度较细,压实作用导致储层致密,储集空间主要为粒间孔、长石和浊沸石溶孔[图 15(g)~图 15(i)],物性整体较差,平均孔隙度和渗透率分别为 6.3%和 0.12 mD。

3.3.3 石油运聚及成藏特征

在长 6 段和长 8 段储层中,流体包裹体的均一温度表现出 60~80 ℃、100~120 ℃两期峰值,这揭示了三边地区的原油存在两期充注(图 20)。鄂尔多斯盆地长 7 段泥岩在排烃期存在明显的过剩压力,通过声波时差参数计算,三边地区的过剩压力约为 13 MPa,这为液态烃的运移提供了较好的动力。在长 7 段 3 亚

段最大湖泛期之后,三边地区发育大规模建设性三角洲,形成了相互交织的水下分流河道和河口坝砂体,砂体叠置厚度大,连续性好,这为石油的垂向和侧向运移提供了良好的运移通道。此外,三边地区储层中高角度裂缝相对发育,对石油的垂向运移起到了重要影响^[41]。长 6 段和长 8 段油藏在生烃增压作用下沿裂缝优先垂向运移,经过三角洲前缘水下分流河道高渗带向 NE 方向运移,形成了大规模富集区;长 7 段油藏则主要为侧向运移,烃类排出后沿油层内的砂体运移,但由于长 7 段沉积期砂体分布局限,整体物性较差,仅在局部形成富集带^[42-43](图 21)。

长庆油田利用三维地震资料精细刻画了微一小断裂的分布特征,落实了多个含油有利区。根据容积法、估算最终采收率(EUR)类比法的初步评价,三边地区的石油资源量为 3×10⁸ t。

3.4 延长组下组合

根据沉积旋回发育特征,三叠系延长组可划分为 3 个沉积组合,其中,长 9 段—长 10 段为下组合。在湖盆发展过程中,沉积中心发生迁移,延长组下组合沉积阶段的湖盆中心主要位于志丹—甘泉地区一带^[44-45]。长 9 段—长 10 段是延长组勘探程度最低的层系,已有钻探成果表明,其油藏类型主要为岩性油藏。

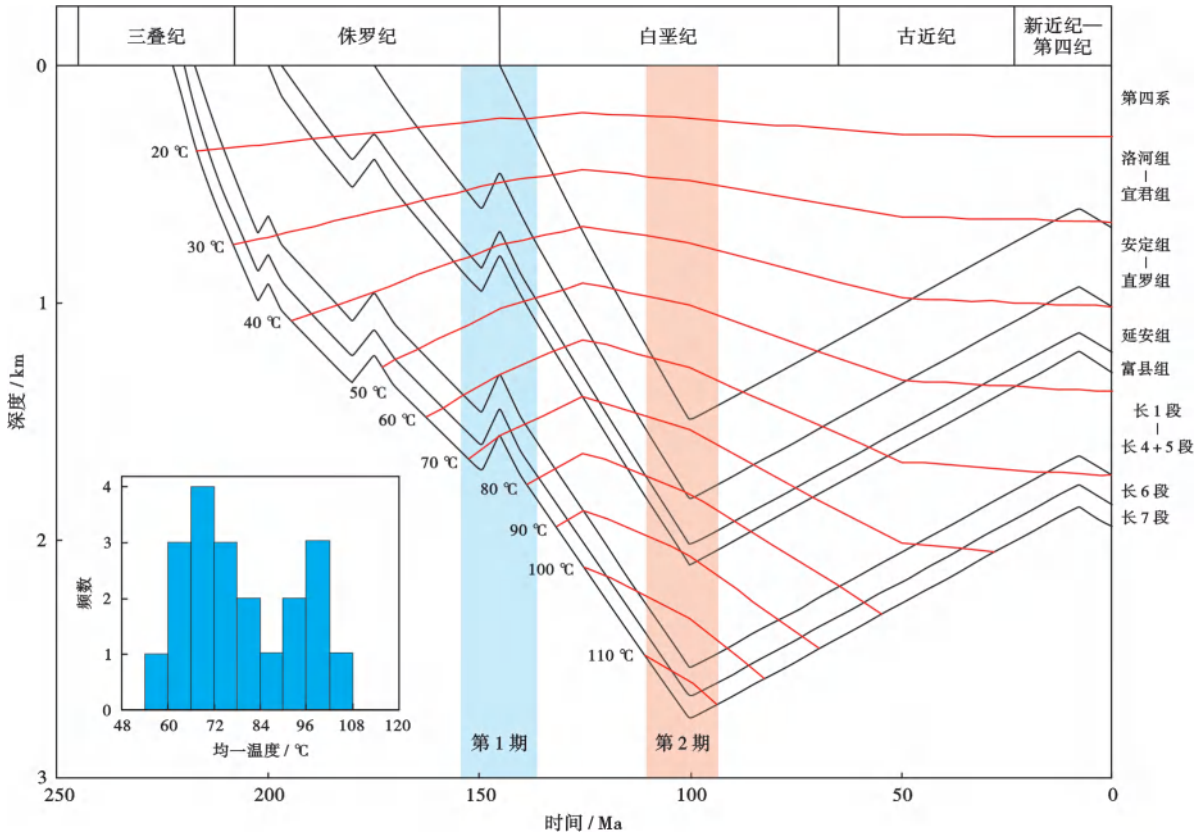
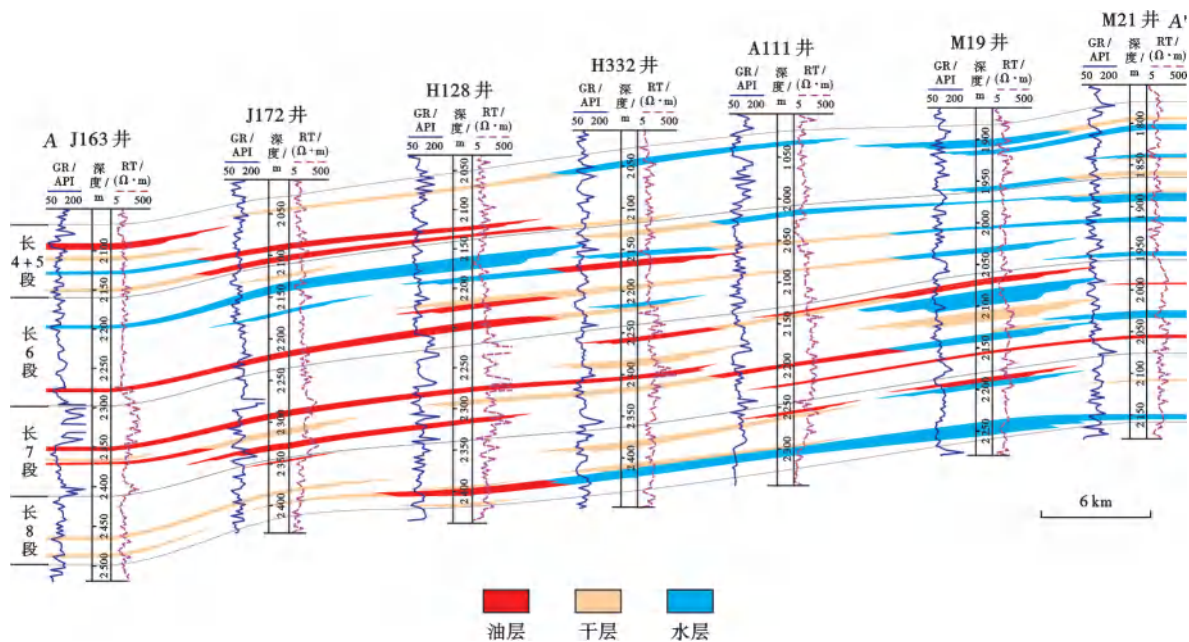


图 20 三边地区长 7 段埋藏热演化史及烃类充注期次

Fig. 20 Buried thermal evolution history and hydrocarbon charging stages of the Member 7 of Yanchang Formation in Sanbian area



注:GR—自然伽马;RT—电阻率。

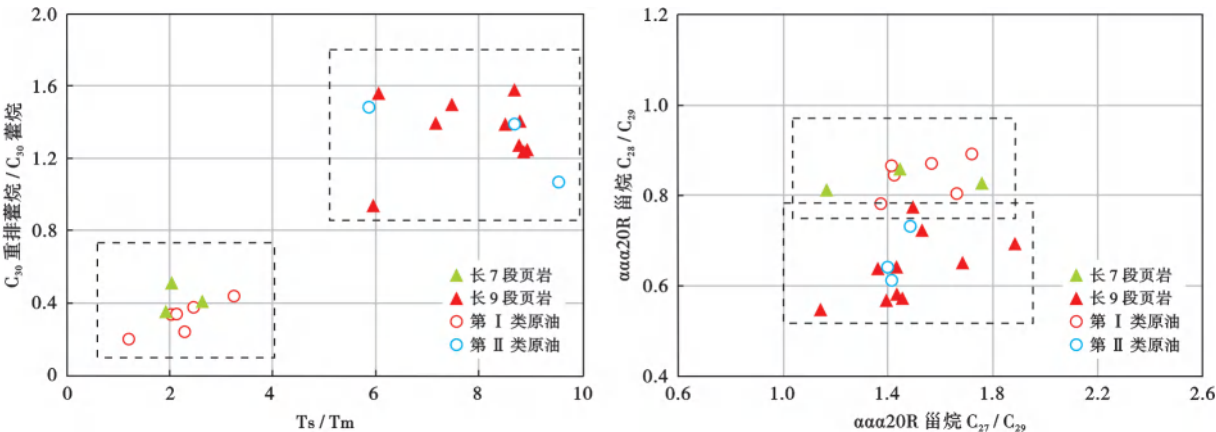
图 21 三边地区长 8 段—长 4+5 段的油藏分布特征(剖面位置见图 3)

Fig. 21 Reservoir distribution characteristics from Member 8 to Member 4 and 5 of Yanchang Formation in Sanbian area

3. 4. 1 烃源岩特征

油源对比结果表明,延长组下组合的原油具有混源的特征,存在长 7 段和长 9 段两种油源。通过烃源岩与原油的生物标志化合物对比,原油中 C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷与 Ts/Tm 、 $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷 C_{28}/C_{29} 与 $\alpha\alpha\alpha 20R$

甾烷 C_{27}/C_{29} 的关系显示,长 9 段原油一部分与长 7 段 3 亚段烃源岩具有相似性,另一部分则与长 9 段烃源岩的特征相近(图 22),这揭示了长 9 段油层组的原油存在两种来源,这一结论与前人认识基本一致^[20,46]。



注:Ts—18 α (H)-22,29,30 三降新藿烷;Tm—17 α (H)-22,29,30 三降藿烷。

图 22 延长组下组合烃源岩及原油的生物标志化合物特征对比

Fig. 22 Comparison of biomarker compounds of source rock and crude oil in the lower assemblage of Yanchang Formation

3. 4. 2 储层特征

长 10 段沉积期主要发育河流和三角洲沉积,三角洲平原和三角洲前缘亚相大规模发育^[29,39],可容纳空间相对较小,河流相与三角洲平原的砂体互相交织切叠,连片性较好,单层砂体的厚度基本大于 15 m。进入长 9 段沉积期,湖盆经历了缓慢湖侵的过程,长 10

段沉积期发育的三角洲平原由于湖平面升高逐渐过渡为三角洲前缘,可容纳空间增大^[29,39],单层砂体的厚度主要为 11~16 m。长 9 段—长 10 段储层的岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩,粒度较细的颗粒在压实作用下颗粒之间呈线状—凹凸接触,发育少量原生及残余粒间孔和长石溶孔[图 15(j)—图 15(l)]。

延长组下组合储层中的填隙物以方解石、铁方解石为主,局部浊沸石含量较高,其次为绿泥石和高岭石,较强的胶结作用使储集空间进一步减少,物性相对较差,孔隙度平均为 9.52%,渗透率平均为 0.31mD,烃类呈非均一充注,油藏呈分散状分布。

3.4.3 石油运聚及成藏特征

延长组下组合油藏具有“自生自储”和“上生下储”两种成藏模式^[20]。“自生自储”油藏以长 9 段为代表,形成了近源成藏的有利源-储组合,勘探潜力最好。陇东地区由于侏罗纪末期构造调整,使得地层呈“早隆晚

凹”特征,烃源岩的生、排烃主要发生在构造反转之前,原油沿上倾方向在高部位富集形成构造-岩性油藏。姬塬地区长 9 段油层组和陕北地区长 10 段油层组主要表现为“上生下储”式的源-储组合特征。长 10 段局部发育滨—浅湖亚相,发育厚度较小的浅灰色—灰色泥岩,生烃能力较差,源岩主要为上部长 9 段及长 7 段烃源岩,在异常压力作用下向下倒灌,在局部富集成藏,由此形成了“长 7 段远源主导、长 9 段近源辅助”的双源供烃模式(图 23)。有利的沉积、成岩相带和较大规模的鼻状隆起是延长组下组合油气大面积聚集成藏的关键。

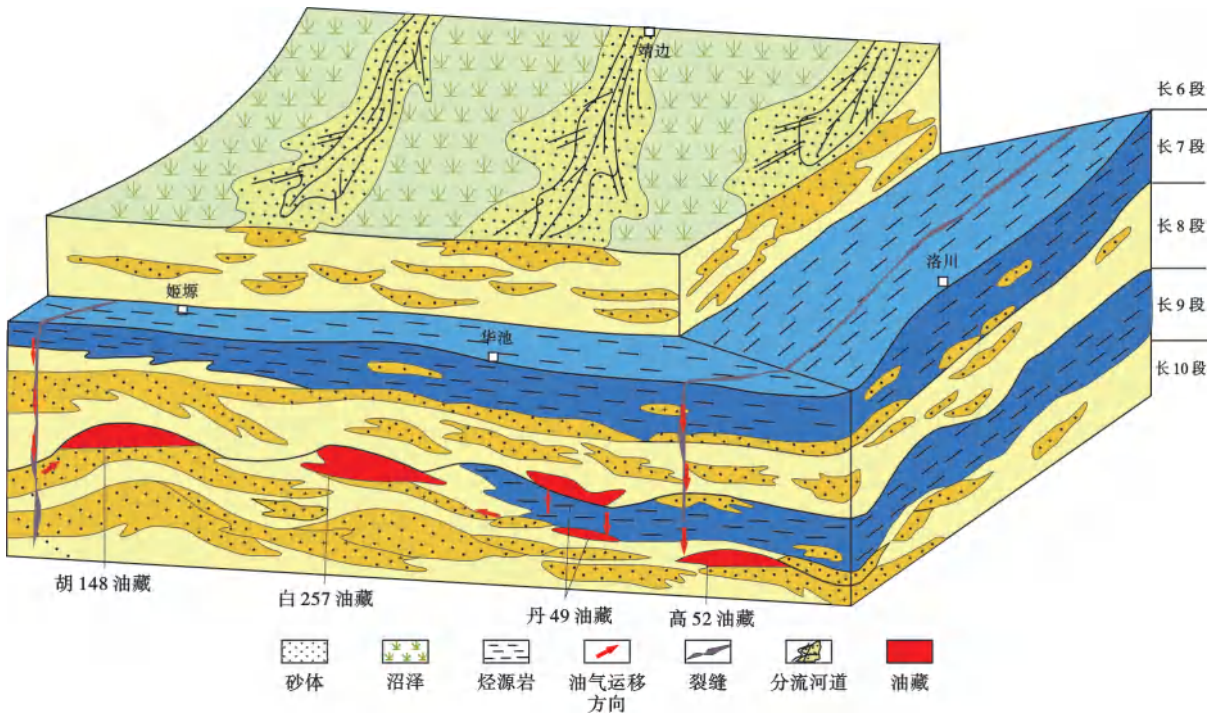


图 23 鄂尔多斯盆地延长组下组合成藏模式(据文献[20]修改)
Fig. 23 Hydrocarbon accumulation model of the lower assemblage of Yanchang Formation in Ordos Basin

近年来,延长组下组合探评井持续获得新突破,姬塬地区长 9 段、吴起—志丹地区长 10 段落落了多个含油有利区,已探明地质储量 1.25×10^8 t,资源潜力为 3×10^8 t。

4 发展前景

陆相淡水湖盆页岩油成藏理论改变了以往深湖区储集体不发育的传统认识,实现了长 7 段从“单一烃源岩”到“源-储一体”认识的转变,推动了盆地长 7 段页岩层系的规模勘探,其中,夹层型页岩油的储量规模为 40.5×10^8 t。鄂尔多斯盆地探明了超 10 亿吨级整装页岩油大油田——庆城油田,建成了超 200 万吨级页岩油开发示范区,其 2022 年的页岩油年产量为 221×10^4 t,占中国页岩油产量的 2/3,率先实现了页岩油的规模勘探效益开发,是目前石油增储上产的主力。围绕夹层型页岩油勘探规模的扩大加大勘探评价力度,

庆城油田外围、三角洲前缘页岩油仍有较大的增储潜力,可形成现实的接替领域。纹层型页岩油在风险勘探中取得了战略性突破,新增预测储量 2.05×10^8 t,初步预测资源潜力为 20×10^8 t,下一步需要坚持勘探开发一体化,加强甜点优选评价,紧跟试采效果,落实含油富集区。页理型页岩油的分布面积约为 4.3×10^4 km²,勘探潜力巨大,需要持续深化理论研究,综合分析页岩的储集性、含油性和可动性等,攻关防坍塌钻井液体系、适配的压裂技术。另外,长 9 段页岩油和古生界乌拉力克海相页岩油也展现出较好的勘探前景。目前,页岩油有望成为长庆油田 6000×10^4 t 以上可持续发展的主力贡献者。根据中国石油天然气集团有限公司加快推进页岩油革命的总体部署,长庆油田规划在 2025 年、2030 年和 2035 年页岩油产量分别达到 350×10^4 t、 450×10^4 t 和 750×10^4 t,与低渗透油藏、致密油

藏形成原油产量的三足鼎立。

天环坳陷—西缘冲断带、三边地区、延长组下组合也具有较好的油气勘探潜力。传统认识认为：天环坳陷断裂规模大，极易导致烃类逸散；三边地区远离生烃中心，砂体致密输导能力差；延长组下组合中，长 7 段烃源岩倒灌成藏难度大，长 9 段烃源岩品质差，均不存在规模成藏的地质条件。近年来，通过不断深化烃源岩、输导体系、断裂系统、源-储配置关系研究，地质认识指导了新区、新领域的勘探突破。通过构建多因素复合控藏新认识，实现了天环坳陷—西缘冲断带复杂构造区从“构造低部位难成藏”到“源-储-断复合控藏”的转变，形成了于家梁、环县西、平凉北 3 大接替领域，资源潜力超过 5×10^8 t；通过坚持规模评价与精细挖潜并重，实现了从“大面积砂带预测”到“差异化成藏目标分析”的转变，有力支撑了三边地区立体勘探新领域，预计资源潜力约为 3×10^8 t；通过持续加强新领域成藏-成储的地质认识，实现了从“长 6 段和长 8 段的规模集中勘探”到“长 9 段和长 10 段的甩开勘探”，在延长组下组合发现了多个含油有利区，资源潜力为 3×10^8 t。

鄂尔多斯盆地石油勘探总体处于中期阶段，仍具有较大的增储潜力，新领域、新类型将成为重要战略接替资源。石油勘探将立足国家战略需求，围绕新类型、新领域不断深化地质研究，强化技术攻关，为中国非常规领域的油气勘探开发提供“长庆经验”，为保障国家能源安全做出新贡献。

5 结 论

(1) 页岩油资源潜力较大，勘探前景广阔，是长庆油田 $6\,000 \times 10^4$ t 以上可持续发展的主力贡献者。其中，夹层型页岩油是目前增储上产的现实领域，纹层型页岩油有望成为下一步接替领域，页理型页岩油是远景目标。另外，长 9 段页岩油和古生界乌拉力克海相页岩油也展现出较好的勘探前景。

(2) 天环坳陷—西缘冲断带发育大规模多期的三角洲平原砂体，储层中的粒间孔和溶蚀孔形成了良好的储集空间。湖盆中心的原油主要通过优势砂体和断裂运移并在高部位聚集成藏，在长 8 段、长 4 + 5 段等形成多个构造-岩性含油圈闭。“源-储-断复合控藏”的认识突破，落实了于家梁、环县西、平凉北 3 大接替领域。

(3) 三边地区整体以三角洲前缘亚相为主，发育连续性较好的水下分流河道砂体。湖盆中部形成的液态烃在长 7 段烃源岩过剩压力的控制下，经孔渗性较好的砂体及微裂缝发生侧向及垂向运移，并在远离生烃中心形成大规模富集的岩性油藏。“差异化成藏目标分析”的认识转变，支撑了三边地区立体勘探新领域

取得发现。

(4) 延长组下组合油藏具有混源成藏的特征，其中，长 9 段泥页岩可作为有效烃源岩，形成长 9 段油层“自生自储”成藏模式；长 7 段和长 9 段两套烃源岩在姬塬地区、陕北地区受生烃增压倒灌影响，形成了“上生下储”成藏模式。长 9 段、长 10 段通过甩开勘探，在延长组下组合发现了多个含油有利区。

参 考 文 献

[1] 贾承造. 中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1445-1464.
JIA Chengzao. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1445-1464.

[2] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 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.

[3] 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.

[4] 郭芪恒, 李士祥, 金振奎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 73 亚段页岩油特征及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 767-781.
GUO Qiheng, LI Shixiang, JIN Zhenkui, et al. Characteristics and exploration targets of Chang 7 shale oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 767-781.

[5] 付金华, 牛小兵, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段 3 亚段页岩油风险勘探突破与意义[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 760-769.
FU Jinhua, NIU Xiaobing, LI Mingrui, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in the 3rd sub-member, 7th Member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 760-769.

[6] 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.

[7] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 12-22.
XI Shengli, LIU Xinshe, HUANG Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 12-22.

[8] 罗安湘, 喻建, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油勘探实践及主要认识[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(3): 253-260.
LUO Anxiang, YU Jian, LIU Xianyang, et al. Practices and cognitions of petroleum exploration in Mesozoic, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(3): 253-260.

[9] 惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 2019, 24(2): 14-22.
HUI Xiao, ZHAO Yande, SHAO Xiaozhou, et al. The geological

conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(2): 14-22.

[10] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1-11.
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.

[11] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 19-40.
FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 19-40.

[12] 何自新, 付金华, 席胜利, 等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 6-12.
HE Zixin, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 6-12.

[13] 郭忠铭, 张军, 于忠平. 鄂尔多斯地块油区构造演化特征[J]. *石油勘探与开发*, 1994, 21(2): 22-29.
GUO Zhongming, ZHANG Jun, YU Zhongping. The evolutional characteristics of structure of the oil and gas bearing areas in Ordos Massif[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 21(2): 22-29.

[14] 杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 733-740.
YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 733-740.

[15] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 418-430.
FU Jinhua, FAN Liyong, LIU Xinshe, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 418-430.

[16] 杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 129-137.
YANG Hua, LIU Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 129-137.

[17] 席胜利, 刘新社, 孟培龙. 鄂尔多斯盆地大气区的勘探实践与前瞻[J]. *天然气工业*, 2015, 35(8): 1-9.
XI Shengli, LIU Xinshe, MENG Peilong. Exploration practices and prospect of Upper Paleozoic giant gas fields in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(8): 1-9.

[18] 师良, 赵彤彤, 查辉, 等. 延安周边地区页岩地球化学特征及页岩油潜力评价[J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 1043-1053.
SHI Liang, ZHAO Tongtong, ZHA Hui. Geochemical characteristics and shale oil potential of shale in the Yan'an area[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 1043-1053.

[19] 罗丽荣, 李剑锋, 杨伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡长 9 烃源岩特征与生烃潜力[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(3): 278-284.
LUO Lirong, LI Jianfeng, YANG Weiwei, et al. Characteristics and hydrocarbon generation potential of Chang 9 source rocks on Yishaan slope, Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(3): 278-284.

[20] 李相博, 刘显阳, 周世新, 等. 鄂尔多斯盆地延长组下组合油气来源及成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 172-180.
LI Xiangbo, LIU Xianyang, ZHOU Shixin, et al. Hydrocarbon origin and reservoir forming model of the Lower Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 172-180.

[21] 席胜利, 刘新社, 任军峰, 等. 鄂尔多斯盆地风险勘探领域油气成藏认识新进展与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 34-48.
XI Shengli, LIU Xinshe, REN Junfeng, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation and exploration potential in risk exploration field in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 34-48.

[22] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 870-883.
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 870-883.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 李士祥, 郭芪恒, 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. Reservoir characteristics and exploration direction of pure shale-type shale oil in the 3rd sub-member, 7th Member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1509-1519.

[26] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 537-545.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 537-545.

[27] 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.

[28] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1079-1089.

[29] 郭艳琴, 惠磊, 张秀能, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系

特征及湖盆演化[J]. 西北大学学报:自然科学版,2018,48(4):593-602.

GUO Yanqin, HUI Lei, ZHANG Xiuneng, et al. Sedimentary system characteristics and lake basin evolution of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2018, 48(4): 593-602.

[30] 白玉彬,赵靖舟,高振东,等. 鄂尔多斯盆地杏子川油田长9 烃源岩特征及油气勘探意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(4):38-45.

BAI Yubin, ZHAO Jingzhou, GAO Zhendong, et al. Characteristics of Chang 9 Member source rocks and its significance of hydrocarbon exploration in Xingzichuan oilfield, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(4): 38-45.

[31] 马占荣,白海峰,刘宝宪,等. 鄂尔多斯西部地区中一晚奥陶世克里摩里期—乌拉力克期岩相古地理[J]. 古地理学报,2013,15(6):751-764.

MA Zhanrong, BAI Haifeng, LIU Baoxian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Middle-Late Ordovician Kelimoli and Wulalike ages in western Ordos area[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6): 751-764.

[32] 席胜利,黄军平,张才利,等. 鄂尔多斯盆地西缘石炭系羊虎沟组油砂的发现与油源分析[J]. 地质学报,2022,96(3):1041-1052.

XI Shengli, HUANG Junping, ZHANG Caili, et al. Discovery of oil sands in the Yanghugou Formation in the western margin of Ordos Basin and its source analysis[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(3): 1041-1052.

[33] 席胜利,魏嘉怡,张才利,等. 鄂尔多斯盆地海相页岩油勘探发现及意义[J]. 石油学报,2023,44(2):253-269.

XI Shengli, WEI Jiayi, ZHANG Caili, et al. Discovery and significance of marine shale oil exploration in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 253-269.

[34] 刘池洋,赵红格,王锋,等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报,2005,79(6):737-747.

LIU Chiyang, ZHAO Hongge, WANG Feng, et al. Attributes of the mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 737-747.

[35] 彭恒,刘显阳,刘池洋,等. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景[J]. 地质学报,2022,96(2):387-402.

PENG Heng, LIU Xianyang, LIU Chiyang, et al. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos basin margin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 387-402.

[36] 赵文智,王新民,郭彦如,等. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地恢复及其改造演化[J]. 石油勘探与开发,2006,33(1):6-13.

ZHAO Wenzhi, WANG Xinmin, GUO Yanru, et al. Restoration and tectonic reworking of the Late Triassic basin in western Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 6-13.

[37] 张园园,任战利,桂桂林,等. 天环凹陷南段中生界断裂特征及其石油地质意义[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(2):318-328.

ZHANG Yuanyuan, REN Zhanli, YANG Guilin, et al. Characteristics and petroleum geological significances of Mesozoic faults in the southern section of Tianhuan depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 318-328.

[38] 曹晶晶,刚文哲,杨尚儒,等. 鄂尔多斯盆地天环凹陷南段长8 段油藏成藏主控因素及模式[J]. 天然气地球科学,2023,34(10):1752-1767.

CAO Jingjing, GANG Wenzhe, YANG Shangru, et al. Main controlling factors and hydrocarbon accumulation model of Chang 8 reservoir in southern Tianhuan depression, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1752-1767.

[39] 李文厚,刘溪,张倩,等. 鄂尔多斯盆地中晚三叠世延长长期沉积演化[J]. 西北大学学报:自然科学版,2019,49(4):605-621.

LI Wenhou, LIU Xi, ZHANG Qian, et al. Deposition evolution of middle-late Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2019, 49(4): 605-621.

[40] 李明瑞,侯云超,谢先奎,等. 鄂尔多斯盆地平凉—演武地区三叠系延长组油气成藏模式及勘探前景[J]. 石油学报,2023,44(3):433-446.

LI Mingrui, HOU Yunchao, XIE Xiankui, et al. Hydrocarbon accumulation mode and exploration prospect of Triassic Yanchang Formation in Pingliang-Yanwu area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 433-446.

[41] 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.

[42] 楚美娟,李士祥,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地延长组长8 油层组石油成藏机理及成藏模式[J]. 沉积学报,2013,31(4):683-692.

CHU Meijuan, LI Shixiang, LIU Xianyang, et al. Accumulation mechanisms and modes of Yanchang Formation Chang 8 interval hydrocarbons in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 683-692.

[43] 全敏波,高栋臣,张永飞,等. 鄂尔多斯盆地西部新安边地区延长组成藏模式[J]. 延安大学学报:自然科学版,2013,32(2):67-69.

TONG Minbo, GAO Dongchen, ZHANG Yongfei, et al. Hydrocarbon accumulation model of Yanchang Formation in Xinanbian area, western of Ordos Basin [J]. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 2013, 32(2): 67-69.

[44] 完颜容,李相博,刘化清,等. 鄂尔多斯盆地延长组下组合沉积期湖盆迁移演化及沉积响应[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2014,41(1):27-35.

WANYAN Rong, LI Xiangbo, LIU Huaqing, et al. Migration evolution of lake basin and sedimentary response in deposition period of lower assemblage in Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2014, 41(1): 27-35.

[45] 完颜容,李相博,刘化清,等. 鄂尔多斯盆地延长组长10 期沉积环境与沉积体系[J]. 沉积学报,2011,29(6):1105-1114.

WANYAN Rong, LI Xiangbo, LIU Huaqing, et al. Depositional environment and sedimentary system of Chang 10 stage Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1105-1114.

[46] 何雁兵,傅强,金艳,等. 鄂尔多斯盆地英旺地区长9、长10 油层组油源及成藏分析[J]. 岩性油气藏,2012,24(5):55-60.

HE Yanbing, FU Qiang, JIN Yan, et al. Oil sources and accumulation analysis of Chang 9 and Chang 10 oil reservoir set in Yingwang area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 55-60.

(收稿日期 2023-08-30 改回日期 2023-10-27 编辑 雷永良)