

鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中上段 有利砂体控制因素及预测

徐庚¹, 严雪¹, 吴楠¹, 胡琮², 雷宇², 张文选²

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 陕西西安 710018)

摘要:三叠系延长组是鄂尔多斯盆地陇东地区主要的含油层系。根据测井、地震、岩心、薄片、物性及含油气性等资料,分析研究区延长组中上段前积层段储层特征及有利砂体控制因素,对有利砂体进行预测。结果表明:鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中上段储层岩石类型主要为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩和长石砂岩;孔隙度主要分布于 8.0%~12.0%,渗透率主要分布于 $(0.10\sim 0.30)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属于致密储层。有利砂体发育受古地貌、沉积相及岩相因素控制,缓坡带和坳陷带为有利砂体最发育的地貌单元,三角洲前缘的水下分流河道微相及深水重力流的砂质碎屑流沉积微相是有利砂体形成的主要沉积相带,块状层理细砂岩相是有利砂体最发育的岩相类型。研究区有利砂体可分为 I—III 类, I 类砂体主要分布于缓坡带的水下分流河道微相, II 类砂体主要分布于缓坡带及坳陷带的砂质碎屑流沉积微相, III 类砂体主要分布于斜坡带和坳陷带远端的河道侧缘及浊流沉积微相。该结果对鄂尔多斯盆地陇东地区的下一步勘探具有指导意义。

关键词:控制因素;有利砂体;储层特征;三叠系;延长组中上段;陇东地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2;P631.81 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)01-0045-11

0 引言

鄂尔多斯盆地是中国典型的陆相坳陷盆地,蕴含丰富的油气资源,其中陇东地区是石油勘探开发的主要区域,三叠系延长组为最主要的含油层系,是近年来油气勘探的热点^[1-2]。由于地震资料分辨率不足、品质较差等,传统的延长组地层划分采用以标志层约束和大体等厚的旋回对比方法,地层具有“平起平落、整体沉降、等厚分布”的特征^[3-5],不同沉积体系及沉积相带等的展布在盆地内基本不发生变化,与整体陆相坳陷湖盆的沉积特征和模式不符^[6]。根据三维地震资料,陇东地区延长组中上段可见明显前积反射现象,地层展布与传统地层划分表现出明显的差异性,前积现象对应前积斜坡地质单元,多见于湖泊或海洋的坡架及边缘位置,是油气运移和聚集的重要场所^[7-10]。根据井—震相互约束和标定、岩心相标志,李一凡等^[11]将甘肃庆城延长组中上部前积反射层段划分为 6 期前积斜坡体(F1—F6);基于三维地震和钻井资料,夏勇等^[12]将庆城地区延长组长 7—长 1 油层组依次划分为 6 期前积斜坡体(F1—F6);以湖泛期凝缩层对应的地震同相轴作为地层界面对比标志,惠潇等^[6]将延长组中上段划分为 7 个层序组。这些研究主要集中于陇东地区延长组中上部前积反射层段的层序格架与砂体展布等方面^[11-15],但有关前积反射层段中储层有利砂体的研究较少。

基于测井、岩心、薄片和物性等资料,延长组储层发育主要受物源、沉积环境和成岩作用等因素控制^[16-18]。根据薄片鉴定及物性数据统计分析,李凤杰等^[19]认为沉积作用和成岩作用对陇东地区延长组储层性质影响较大,基准面旋回的升降控制储层物性韵律的分布;基于岩心分析和测井资料,付晶等^[20]认为陇东地区延长组储层质量受沉积微相分布、砂体叠置样式和规模,以及岩石颗粒大小的影响;吴旭光^[21]和李盼盼等^[22]分析陇东地区延长组不同油层组储层特征及控制因素,认为沉积微相为储层物性提供先天物质基础,成岩作用是物性演化的关键因素。在新的地震地层格架下,对延长组中上段储层有利砂体控制因素的认识未取得突破。

收稿日期:2024-05-07;编辑:朱秀杰

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42172179)

作者简介:徐庚(2000—),男,硕士研究生,主要从事沉积储层方面的研究。

通信作者:严雪,E-mail:yanxue0826@163.com

根据地震、测井、岩心、薄片、物性及含油气性等资料,研究鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中上段前积层段的储层特征,明确有利砂体控制因素,进行有利储层预测,为陇东地区延长组中上段前积地层的研究提供支持。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是一个稳定沉降、拗陷迁移和扭动明显的多旋回克拉通盆地,属于华北克拉通的一部分^[23-24]。研究区位于盆地伊陕斜坡带的西南部边缘(见图1(a))。延长组沉积演化经历4个完整阶段,即

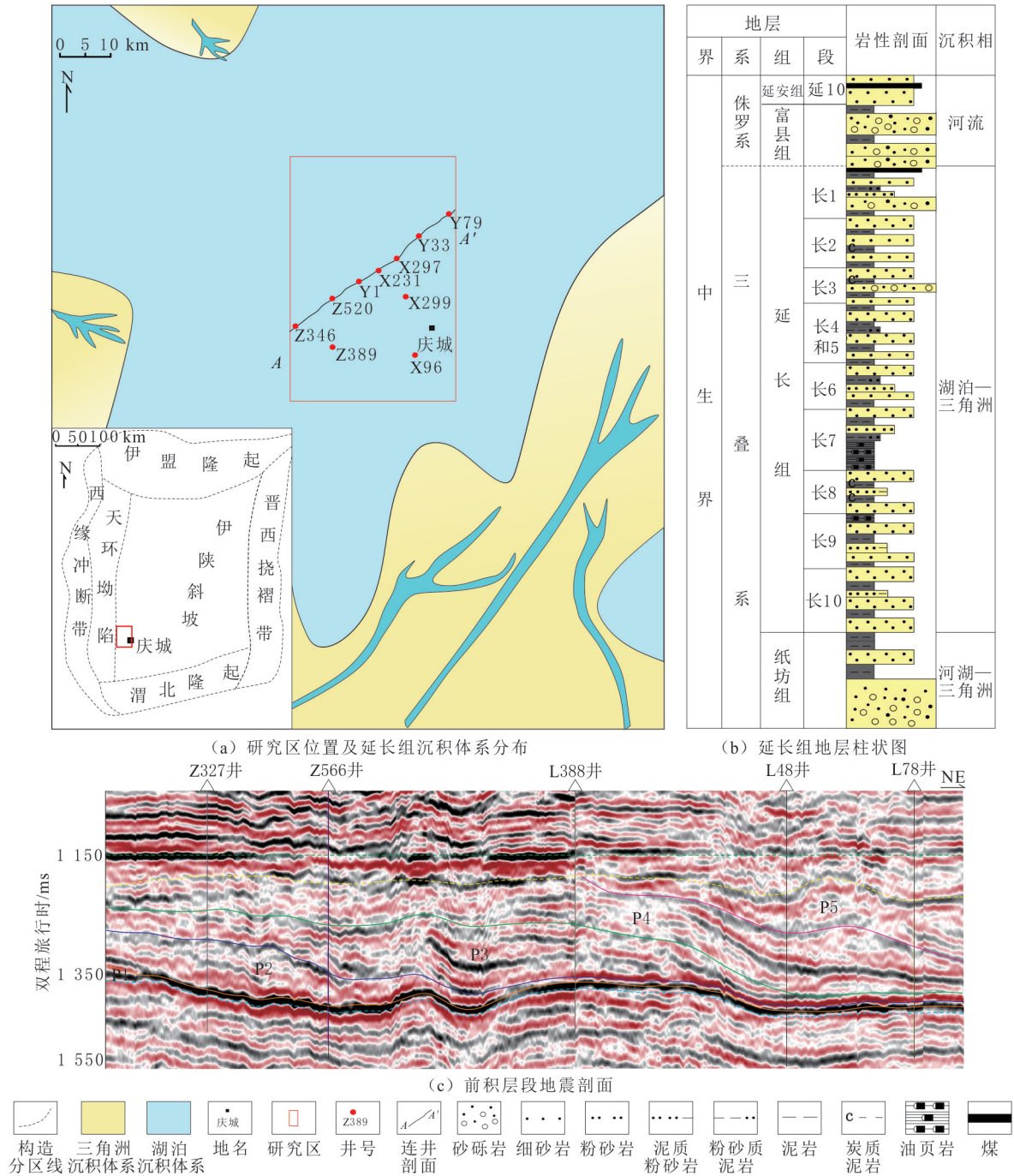


图1 研究区位置、延长组沉积体系、地层特征及地震剖面

Fig. 1 Location of the study area and sedimentary system, stratigraphic characteristics and seismic profile of Yan-chang Formation

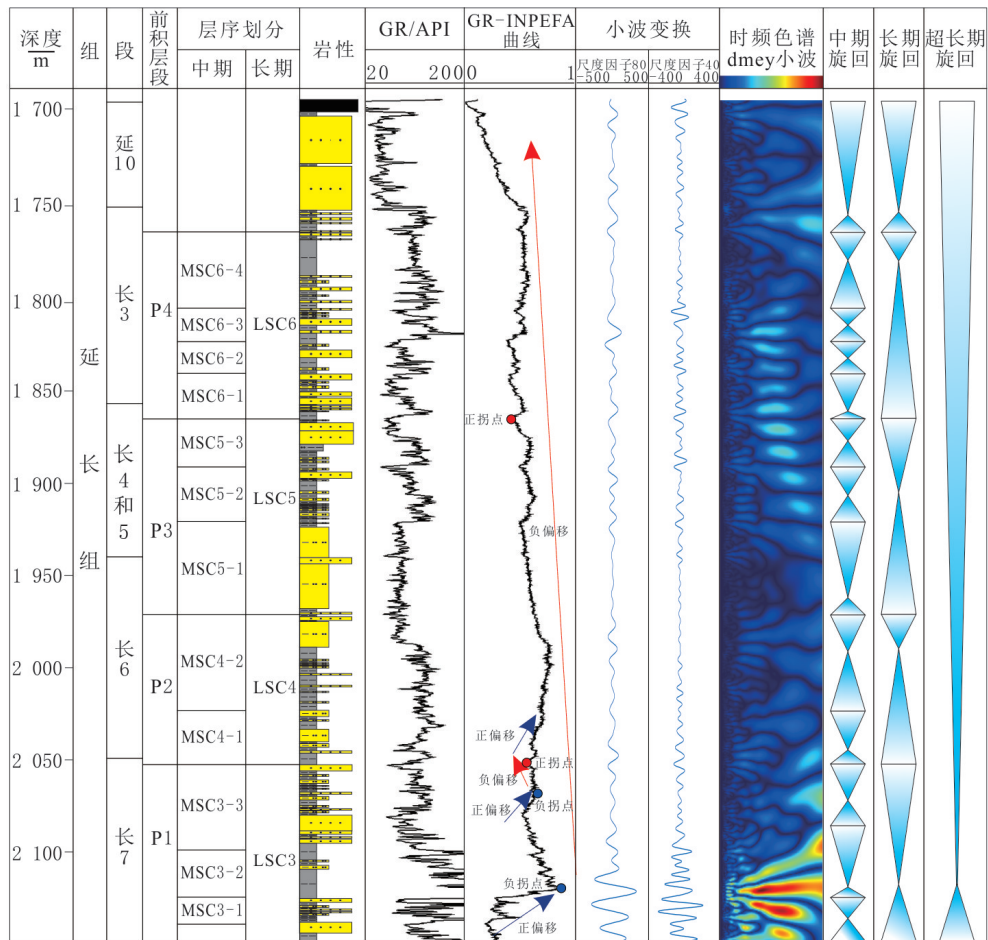
初始拗陷阶段、强烈拗陷阶段、回返抬升阶段和萎缩消亡阶段,长 7 段沉积期,湖盆进入最大湖泛期,随后湖盆逐渐萎缩^[25-27]。延长组在盆地内部整体发育三角洲—湖泊沉积体系(见图 1(b)),岩性为一套灰绿色、灰色中厚层中—细砂岩、粉—细砂岩和深灰色、灰黑色泥岩组合。由地震剖面(见图 1(c))可知,研究区延长组中上段可见明显的前积反射层段,对应传统分层的长 7—长 1 油层组,为文中研究目的层段,表现为中强振幅、中频、中等连续—连续反射特征,可见 S 型、S 和斜交复合型、斜交型反射前积现象。

利用小波变换^[28]和 INPEFA 曲线^[29-30]对单井 GR 曲线进行沉积旋回分析。Z389 井位于湖盆边缘,自下而上依次划分为 4 个长期旋回和 12 个中期旋回(见图 2(a));X299 井位于湖盆中心,自下而上依次划分为 5 个长期旋回和 10 个中期旋回(见图 2(b))。结合岩心及三维地震资料,延长组中上部地层从湖盆边缘至湖盆中心共识别 5 个长期旋回,自下而上依次对应 P1—P5 前积层段,其中 P1—P2 前积层段在湖盆中心发育较薄(见图 1(c))。相对于传统地层模式,新的地层格架具有明显的“穿层”现象,更符合湖盆演化特征。P1—P4 前积层段以进积的形式呈透镜状不断向湖盆中心推进,沉积期主要发育辫状河三角洲—深湖、半深湖沉积体系;P5 前积层段以加积的形式沉积,沉积期水体变浅,主要发育辫状河三角洲—滨浅湖沉积体系。在湖退背景下,三角洲和重力流沉积不断在湖盆中心充填,为储层砂体的发育提供场所,是主要勘探地域。

2 储层特征

2.1 岩石学特征

陇东地区延长组中上段前积层段薄片鉴定统计表明,碎屑组分以长石、石英和岩屑为主。其中,长石体积分数为 18.0%~67.0%,平均为 36.6%;石英体积分数为 12.0%~48.0%,平均为 41.8%;岩屑体积



(a) 湖盆边缘Z389井

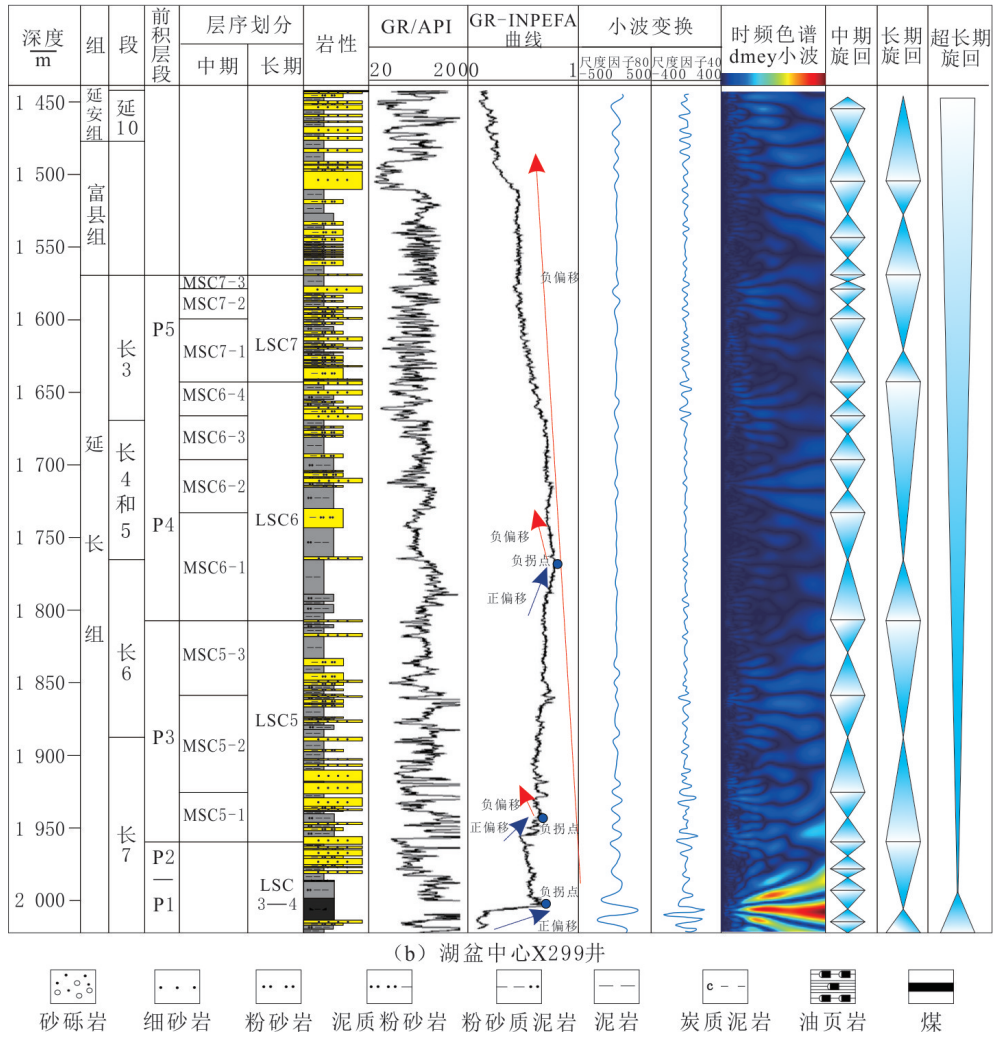


图 2 陇东地区延长组中上段单井层序地层划分
Fig. 2 Sequence stratigraphy division of single well in the middle and upper members of Yan-chang Formation in Longdong Area

分数为 10.0%~40.0%，平均为 18.2%。砂岩类型主要为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩及长石砂岩，岩屑砂岩体积分数较少，长石体积分数整体较高(见图 3)。岩屑组成主要为碎屑云母、碎屑变质岩岩屑及火成岩岩屑，沉积岩岩屑较少。砂岩填隙物主要为胶结物，杂基体积分数较低，包括高岭石、绿泥石、方解石、白云石、石膏及石英加大等。砂岩粒度普遍较细，主要以细砂为主，粉砂次之，分选好—中等，磨圆度以次棱角状为主，其次为棱角状和次圆状，颗粒支撑，颗粒以线接触为主。延长组中上段砂岩储层总体上为成分成熟度较低、结构成熟度中等—好的岩石类型。

2.2 岩相特征

研究区延长组中上段发育细砂岩、粉砂岩、泥(页)岩及凝灰岩等岩性。根据岩心的岩性、结构及沉积构造等特征，识别块状层理细砂岩相、交错层理细砂岩相、平行层理细砂岩相、沙纹层理粉砂岩相、变形层理粉砂岩相、水平层理(泥质)粉砂岩相、鲍马序列粉(细)砂岩相、暗色泥岩相和凝灰岩相 9 种岩相类型。由于水平层理(泥质)粉砂岩相、暗色泥岩相和凝灰岩相较为致密，变形层理粉砂岩相在形成过程中发生滑塌沉积而不易保存，不能形成良好的储层。块状层理细砂岩相的岩性为灰色、灰褐色细砂岩(见图 4(a))，为块体搬运快速堆积而形成，局部可见泥岩撕裂屑、泥包砾及次棱角状泥砾等构造，沉积物粒度变化大，颗粒分选及磨圆较差，结构成熟度较低，为砂质碎屑流成因；交错层理细砂岩相的岩性为灰色、灰白色细砂岩(见图 4(b))，主要发育楔状、板状及槽状等交错层理，分选磨圆较差，发育于三角洲前缘的水下分流河道

或河口砂坝;平行层理细砂岩相的岩性为浅灰色、灰色细砂岩(见图 4(c)),分布于前积层段上段,分选磨圆较差,常发育于三角洲前缘的水下分流河道或河口坝;沙纹层理粉砂岩相的岩性为浅灰色、灰色粉砂岩(见图 4(d)),发育大量沙纹层理,分选磨圆较好,见生物扰动构造,主要沉积于三角洲前缘河道侧缘环境;鲍马序列粉(细)砂岩相的岩性为灰色、深灰色粉(细)砂岩(见图 4(e)),发育水平纹层、流沙纹层等沉积构造,纵向上形成鲍马序列,在岩层底部可见沟模、槽模及火焰状构造,为浊流沉积的产物。

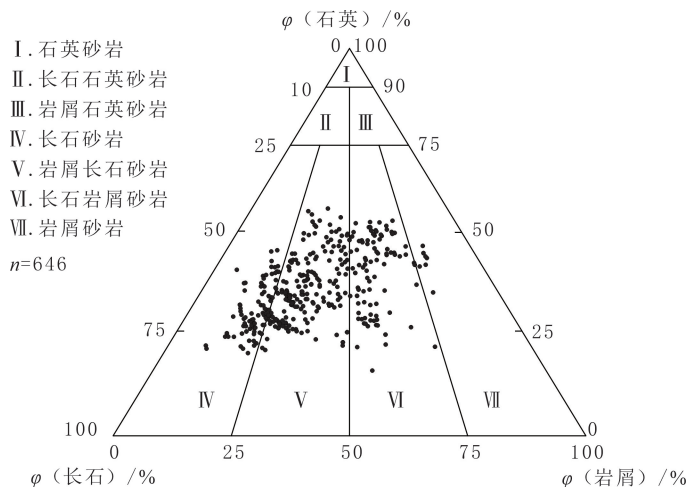
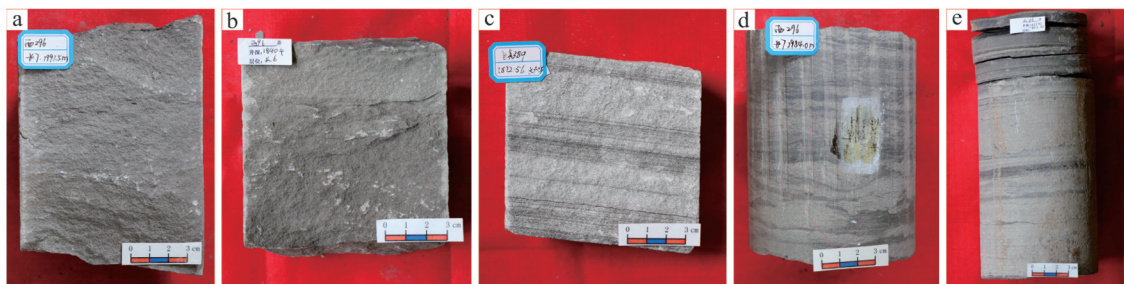


图 3 陇东地区延长组中上段砂岩分类三端元图
Fig. 3 Three-terminal element diagram of sandstone classification in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area



(a) 块状层理细砂岩相, X296井, 长7段, 1 991.50 m; (b) 交错层理细砂岩相, X96井, 长6段, 1 840.40 m; (c) 平行层理细砂岩相, Z389井, 长4、长5段, 1 872.56 m; (d) 沙纹层理粉砂岩相, X296井, 长7段, 1 984.00 m; (e) 鲍马序列粉(细)砂岩相, X96井, 长7段, 1 853.45~1 853.62 m

图 4 陇东地区延长组中上段储层岩相特征

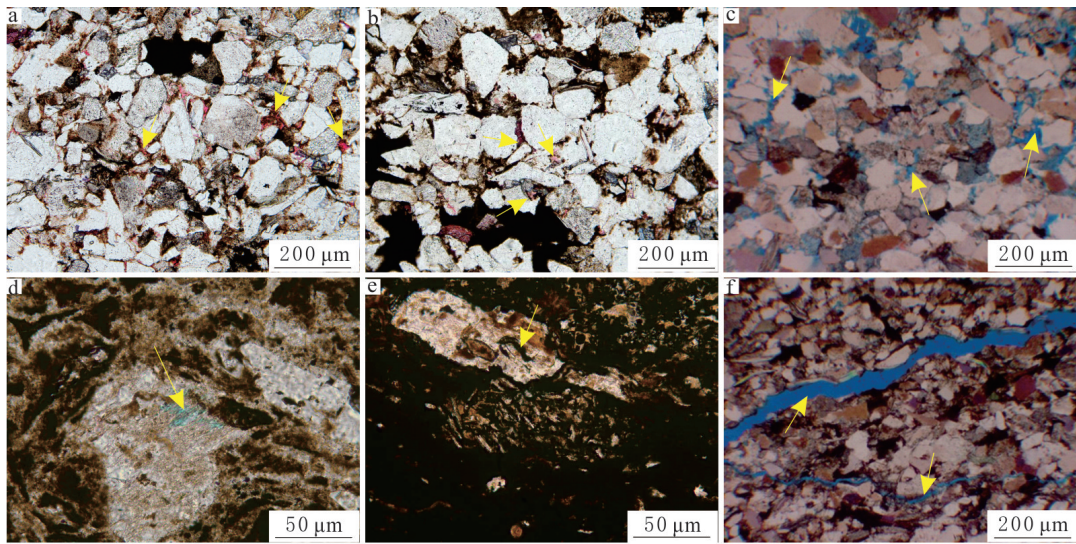
Fig. 4 Lithofacies characteristic of reservoirs in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area

2.3 孔隙类型

根据孔隙成因^[31-34]和几何形状特点^[35-37],以及研究区延长组中上段岩石常规薄片和铸体薄片观察结果,研究区延长组中上段储层原生孔隙主要为粒间孔隙,包括压实剩余的原生粒间孔(见图 5(a))和胶结剩余的原生粒间孔(见图 5(b)),前者颗粒边缘轮廓清晰,颗粒表面和颗粒之间未见明显溶蚀和石英次生加大现象,后者石英颗粒之间存在边缘平整清晰的胶结物。次生孔隙主要为溶蚀作用形成的各类溶蚀孔隙和少量的微裂缝。粒间溶孔为颗粒边缘部分溶蚀或粒间碳酸盐胶结物及杂基选择性溶蚀形成的孔隙,形态不规则,外形呈锯齿状或港湾状(见图 5(c)),常与长石、岩屑溶孔伴生,被细小的溶蚀缝连通。粒内溶孔主要为长石和岩屑颗粒部分溶蚀产生的孔隙,长石溶孔多沿解理缝分布(见图 5(d)),岩屑溶孔多呈不规则分布(见图 5(e))。部分样品中发育微裂缝(见图 5(f)),受构造应力或机械压实作用而形成,一般为切穿长石和岩屑颗粒、杂基或胶结物的微裂缝。研究区延长组中上段储层孔隙类型以压实剩余原生粒间孔和长石、岩屑等溶蚀孔隙为主。

2.4 物性特征

研究区延长组中上段 166 口井 1 646 个岩心样品的物性资料(见图 6)表明,前积层段孔隙度为 2.9%~19.7%,主要分布在 8.0%~12.0%之间,平均为 10.2%;渗透率为 $(0.01\sim 18.67)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,主要分布在 $(0.10\sim 0.30)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $1.49\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。储层孔隙整体相对较好,但渗透率极差。孔隙度与渗透率相关关系较差,说明孔喉连通性差,非均质性较强,部分样品表现异常高渗特征,总体反映低孔、特低渗的物性特征,属于典型的致密储层。



(a) 压实剩余的粒间孔, C75井, 2 006.15 m; (b) 胶结剩余的粒间孔, X96井, 1 852.50 m; (c) 粒间溶孔, C106井, 1 892.60 m; (d) 长石溶孔, Z188井, 1 826.22 m; (e) 岩屑溶孔, Z66井, 2 020.62 m; (f) 微裂缝, Z256井, 2 104.30 m

图 5 陇东地区延长组中上段储层微观孔隙特征

Fig. 5 Micro-pore characteristics of reservoirs in the middle and upper members of the Yanchang Formation in Longdong Area

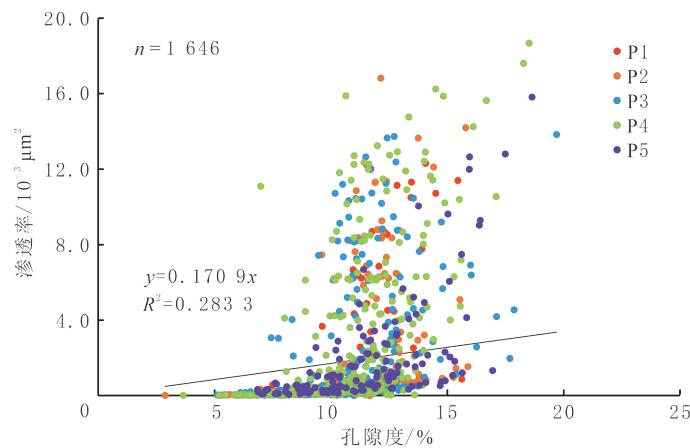


图 6 陇东地区延长组中上段前积层段孔隙度—渗透率交会图

Fig. 6 The intersection of porosity and permeability of foreset beds in the middle and upper members of the Yanchang Formation in Longdong Area

3 有利砂体控制因素

明确有利砂体的控制因素是储层评价和开展甜点预测的关键^[34]。根据对研究区延长组中上部前积层段储层砂体物性特征的分析,认为研究区延长组中上段前积层段储层有利砂体的发育和分布受古地貌、沉积相和岩相控制。

3.1 古地貌

古地貌对碎屑岩沉积体系中沉积相的空间异质性^[38-39]和空间分布^[40-42]具有重要控制作用,深水沉积体系的发育受盆地边缘和盆底平原微古地貌的控制^[43-44],微古地貌的变化影响沉积物重力流的流体性质和流动过程^[45-47]。

陇东地区构造简单,整体表现为向东北倾斜的地貌特征,主要发育缓坡带、斜坡带和坳陷带 3 个地貌单元;物源主要来源于西南部和南部,经三角洲搬运至湖盆中心,受古地貌的影响,重力流砂体为主要来源。研究区缓坡带古地形平缓,以牵引流沉积为主,发育三角洲水下分流河道沉积,单层砂体厚度较大,超过 20 m;斜坡带为沉积物进一步向湖盆中心推进提供动力,是重力流卸载的重要场所,三角洲成因砂体越过陡坡带,在坡上及坡脚处沿沟道形成砂质碎屑流砂体,单层砂体厚度减小,约为 3 m;坳陷带坡度较缓,地形开阔,砂质碎屑流砂体—砂质碎屑流与浊流混合成因砂体—浊流砂体之间相互转换,远端呈分散的舌体展布,单层砂体厚度进一步减小,约为 1 m。

统计不同地貌单元各前积层段砂体的物性、砂地比及含油砂体钻遇率(见图 7),地貌对有利砂体具有明显控制作用。缓坡带砂体物性最好,斜坡带、坳陷带的次之;坳陷带砂地比最高,缓坡带的次之,斜坡带的最低;坳陷带含油砂体钻遇率最高,斜坡带的次之,缓坡带的最低。有利砂体主要分布于缓坡带和坳陷带。

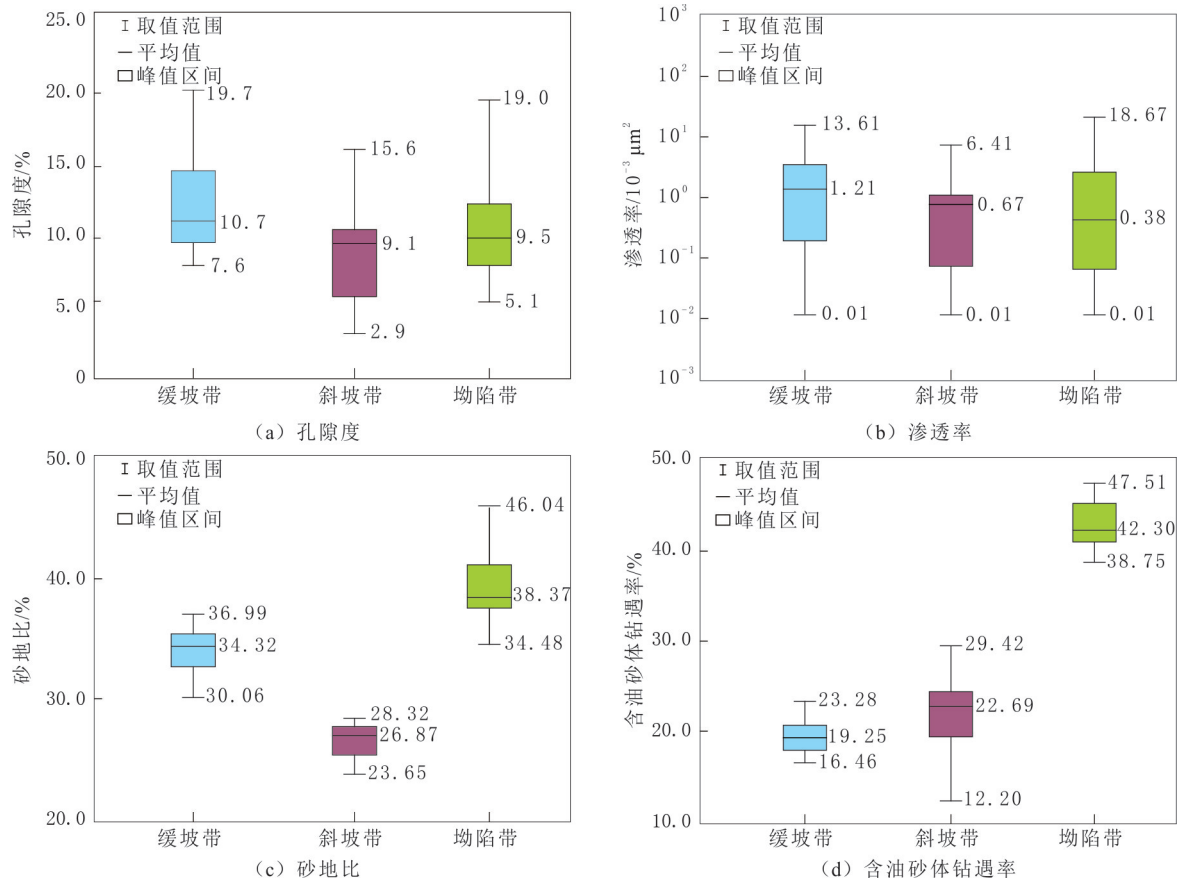


图 7 陇东地区不同地貌单元前积层段物性及含油性分布

Fig. 7 Distribution of physical properties and oil content of foreset beds in different geomorphic units in Longdong Area

3.2 沉积相

沉积体系是砂体成因类型和展布特征的主控因素,不同沉积环境发育不同的沉积相和微相,砂体叠置方式、规模及有利砂体的空间发育位置不同。不同沉积相和微相中所含沉积物的性质与特征也有区别,主要体现在沉积物的颗粒大小、排列方式、层理构造、粒度韵律和几何形态等方面,储层孔隙度和渗透率分布不均,从而影响有利砂体的分布^[48-49]。

由研究区目标层段储层不同沉积微相的砂体发育特征(见表 1)可知,辫状河三角洲前缘亚相的水下分流河道砂体主要发育于靠近物源区的缓坡带,沉积物以中—细砂岩和粉砂岩为主,发育块状层理、波状层理,砂体规模较大,在辫状河三角洲前缘砂体中占比超过 65%,平面上呈带状或分支状展布,剖面上呈孤立或叠加透镜体状。深水重力流水道中的砂质碎屑流沉积砂体主要发育于靠近物源区的坡折带,岩性以细砂岩为主,块状层理较为发育,在重力流砂体中占比超过 75%,平面上主要呈带状或连续不规则舌状,剖面上呈孤立或叠加透镜体状。深水重力流前端朵体亚相中的浊流沉积砂体发育于斜坡带下部和坳陷带,岩性主要为粉砂岩,可见发育较多的鲍马序列和槽模、沟模及火焰状等构造,垂向上可见多个浊流沉积砂体叠置,在重力流砂体中占比超过 80%;位于水道末端的开放性环境,砂体发育不受限制,在平面上呈片状展开而形成朵体沉积,剖面上呈薄层席状或透镜体状。辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体物性最好,平均孔隙度和渗透率最高。深水重力流的砂质碎屑流沉积砂体的物性次之,浊流沉积砂体的物性最差。不同沉积微相砂体占比及物性特征表明,有利砂体物性受沉积相带控制,有利砂体主要分布于辫状河三角洲前缘水下分流河道和深水重力流砂质碎屑流沉积微相。

表 1 陇东地区延长组中上段储层不同沉积微相砂体特征

Table 1 Sandbody characteristics of different sedimentary microfacies in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area

| 沉积相 | 亚相 | 微相 | 砂体占比/% | 平均孔隙度/% | 平均渗透率/ 10 ⁻³ μm ² |
|--------|-------|-----------|--------|---------|--|
| 辫状河三角洲 | 三角洲前缘 | 水下分流河道砂体 | >65 | 11.2 | 0.70 |
| 深水重力流 | 水道 | 砂质碎屑流沉积砂体 | >75 | 10.0 | 0.30 |
| 深水重力流 | 前端朵体 | 浊流沉积砂体 | >80 | 6.0 | 0.13 |

陇东地区延长组中上段沉积相连井剖面(见图 8)显示,水下分流河道沉积砂体连片分布,分布范围广泛;砂质碎屑流沉积和浊流沉积砂体分布范围小,形成一定规模的储层。Z346 和 Z520 井岩心样品位于辫状河三角洲前缘相带,岩性为中—细砂岩和含砾细砂岩,水下分流河道砂体的孔隙度分布区间为 4.7%~18.5%,平均分别为 10.3%和 10.8%,渗透率分布区间为(0.01~18.60)×10⁻³ μm²,平均分别为 0.16×10⁻³和 1.41×10⁻³ μm²;X297 井岩心样品位于深水重力流水道相带,岩性为块状细砂岩,砂体孔隙度分布区间为 7.4%~11.3%,平均为 8.6%,渗透率分布区间为(0.01~12.80)×10⁻³ μm²,平均为 0.11×10⁻³ μm²;Y79 井岩心样品位于深水重力流前端朵体相带,岩性为粒度较细的粉砂岩,平均孔隙度为 8.9%,平均渗透率为 0.17×10⁻³ μm²。从辫状河三角洲前缘亚相向深水重力流前端朵体亚相过渡过程中,孔隙度逐渐变差。此外,同一相带中,随沉积物搬运距离增大,分选变好,物性也有变好趋势。研究区不同沉积相带对有利砂体物性具有较强的控制作用。

3.3 岩相

不同岩相类型储层砂体的岩石类型及沉积结构等存在差异。文中主要以块状层理细砂岩相、交错层理细砂岩相、平行层理细砂岩相、鲍马序列粉(细)砂岩相和沙纹层理粉砂岩相为研究对象,分析储层特征,研究不同岩相对有利砂体的控制作用。块状层理细砂岩相为砂质碎屑流成因,分选较好,砂层厚度一般较大,粒度较粗,不含泥质撕裂屑或泥质夹层,物性及含油气性最好。交错层理细砂岩相、平行层理细砂岩相与沙纹层理粉砂岩相为牵引流成因,物性及含油气性相当,其中沙纹层理粉砂岩相物性及含油气性相对较差。鲍马序列粉(细)砂岩相为浊流成因,可见细砂岩向粉砂岩过渡,顶部可见泥岩,物性最差,具有很强的非均质性(见表 2)。

研究区目标层段储层不同岩相的 160 块样品物性和含油气性资料显示,岩相类型不同,砂体储层特征存在较大差异,岩相对有利砂体的控制作用明显。牵引流、砂质碎屑流和浊流成因砂体是陇东地区延长组中上段的主要储层砂体,相比于浊流,砂质碎屑流和牵引流更有利于有利砂体的发育。研究区砂质碎屑流成因的块状层理细砂岩相是最有利于形成有利砂体的岩相类型,具有较好的物性和试油结果,浊流成因的鲍马序列粉(细)砂岩相形成的储层砂体物性和试油效果较差。

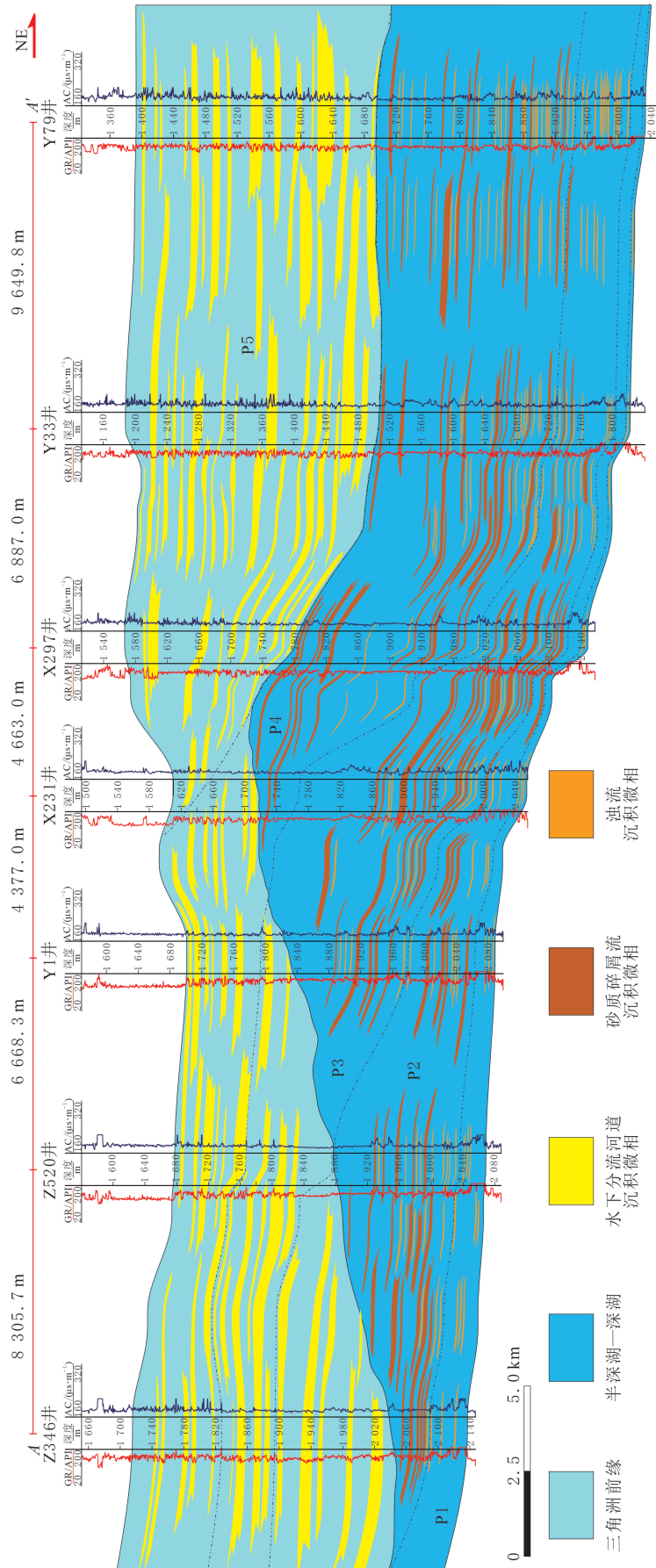


图 8 陇东地区延长组中上段过 Z346—Y1—X231—X297—Y33—Y79 井沉积相连井剖面(位置见图 1 AA' 位置 as shown in fig. 1 AA')

表 2 陇东地区延长组中上段不同岩相类型物性及含油性

Table 2 Physical properties and oil content of different lithofacies types in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area

| 类型 | 孔隙度/% | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 含油气饱和度/% | 含油气性 |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|
| 块状层理细砂岩相 | $\frac{5.41 \sim 19.70}{9.88}$ | $\frac{0.03 \sim 18.67}{0.72}$ | 53.08 | 以差油层为主,油层次之 |
| 交错层理细砂岩相 | $\frac{6.56 \sim 13.42}{8.57}$ | $\frac{0.04 \sim 7.16}{0.32}$ | 51.23 | 差油层 |
| 平行层理细砂岩相 | $\frac{5.52 \sim 16.50}{8.31}$ | $\frac{0.02 \sim 6.55}{0.21}$ | 50.68 | 差油层 |
| 鲍马序列粉(细)砂岩相 | $\frac{2.26 \sim 9.20}{5.30}$ | $\frac{0.01 \sim 3.29}{0.37}$ | 43.55 | 以差油层为主,油层次之 |
| 沙纹层理粉砂岩相 | $\frac{4.85 \sim 10.41}{7.16}$ | $\frac{0.01 \sim 2.97}{0.23}$ | 29.81 | 以差油层为主,油水同层次之 |

注: $\frac{\text{最小} \sim \text{最大}}{\text{平均}}$ 。

4 有利砂体预测

根据有利砂体发育控制因素和钻井油气资料,将岩相类型、沉积微相类型、砂岩累计厚度、古地貌类型、钻井油气显示、孔隙度及渗透率等作为研究区目的层段有利砂体评价参数,对研究区延长组有利砂体进行综合评价(见表 3)。

陇东地区延长组中上段 P1—P5 前积层段沉积时期,沉积水体较深,沉积物粒度整体偏细。牵引流和重力流将大量沉积物搬运至深湖沉积区,携带的泥岩、粉砂岩等经过搬运和沉积,有利于有机质的保存,为油气形成提供条件。重力流搬运过程中,携带的砂质碎屑流和浊流成因的砂体沉积后可以作为主要的储集体,因靠近烃源岩,缩短油气运移的距离并减少运移过程中油气的损耗,有利于油气的保存。在顺物源油藏剖面上可见远离物源区域的油藏优于近物源区域的,且油藏多发育于坳陷带及斜坡带坡脚处(见图 9)。

表 3 陇东地区延长组中上段有利砂体评价方案

Table 3 Evaluation scheme of favorable sand bodies in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area

| 分类 | 岩相类型 | 沉积微相类型 | 砂岩累计厚度/ m | 古地貌类型 | 油气显示 | 孔隙度/% | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ |
|-------|-------------|---------|--------------|---------|----------|----------|---------------------------------|
| I 类 | 块状层理细砂岩相 | 水下分流河道 | >40 | 缓坡带 | 油层、差油层 | >10.0 | >0.50 |
| | 交错层理细砂岩相 | 河口砂坝 | | 坳陷带(远端) | | | |
| II 类 | 块状层理细砂岩相 | 砂质碎屑流沉积 | 10~40 | 缓坡带 | 差油层、油水同层 | 7.0~10.0 | 0.30~0.50 |
| | 平行层理细砂岩相 | 浊流沉积 | | 坳陷带 | | | |
| | 鲍马序列粉(细)砂岩相 | | | 斜坡带(下部) | | | |
| III 类 | 平行层理细砂岩相 | 浊流沉积 | <20 | 坳陷带(远端) | 油水同层、致密层 | 5.5~8.0 | 0.04~0.30 |
| | 鲍马序列粉(细)砂岩相 | 河道侧缘沉积 | | 斜坡带 | | | |
| | 沙纹层理粉砂岩相 | | | | | | |

根据有利砂体评价方案及油气富集规律,对有利砂体进行优选(见图 10)。P3 前积层段沉积时期,研究区主要发育三角洲前缘及半深湖—深湖沉积环境(见图 10(a)),以缓坡带与斜坡带的坡折线为界(见图 10(b)),三角洲前缘主要发育水下分流河道砂体,累计厚度不超过 30 m;半深湖—深湖发育重力流成因砂体,包括砂质碎屑流沉积和浊流沉积,累计厚度较大,一般超过 50 m(见图 10(c))。I 类有利砂体主要分布于缓坡带的水下分流河道微相,II 类有利砂体主要分布于缓坡带及坳陷带的砂质碎屑流沉积微相,III 类有利砂体主要分布于斜坡带、坳陷带远端的河道侧缘及浊流沉积微相(见图 10(d))。

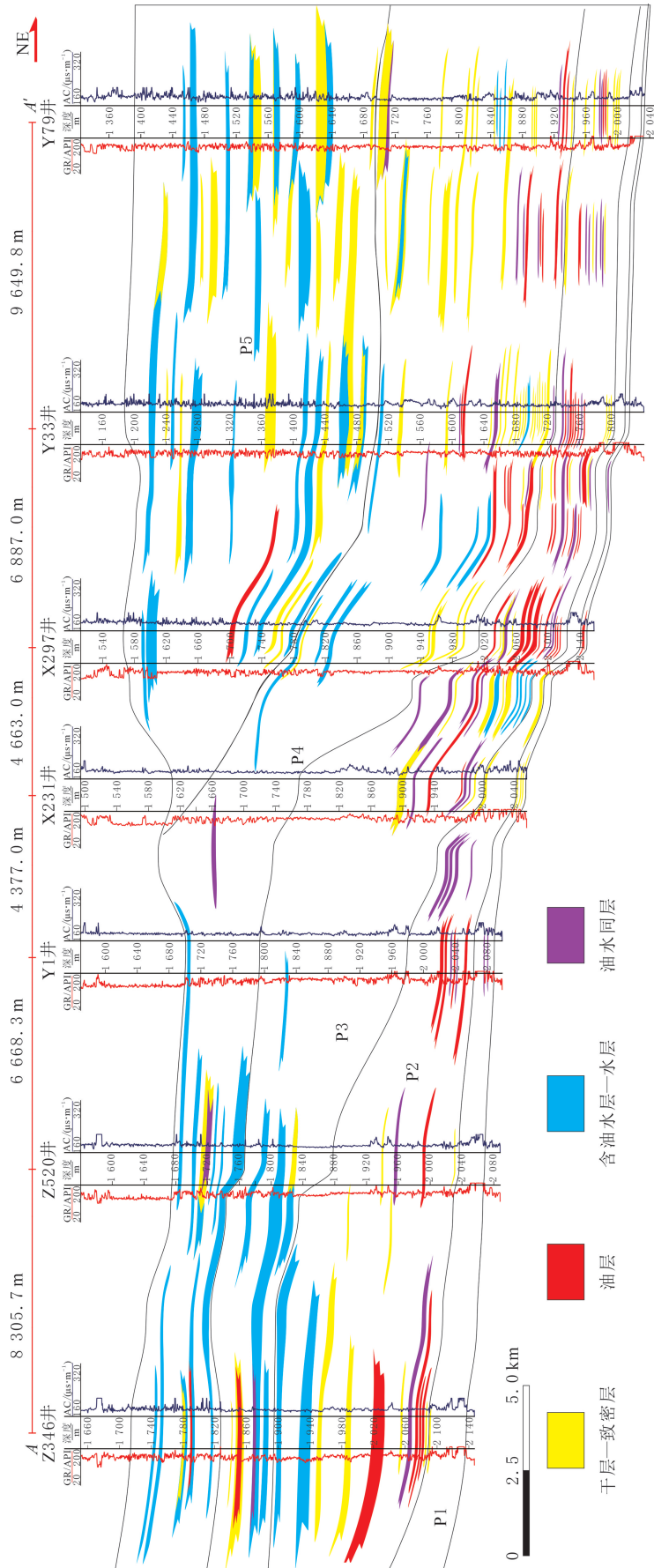
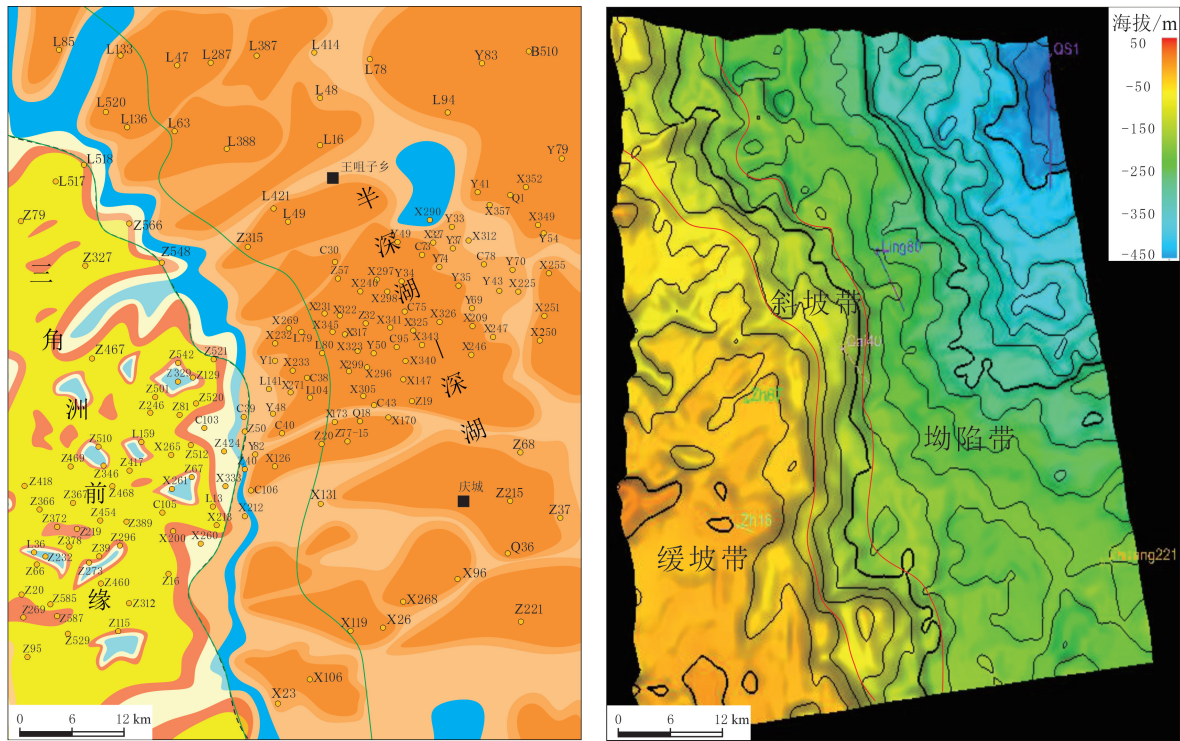
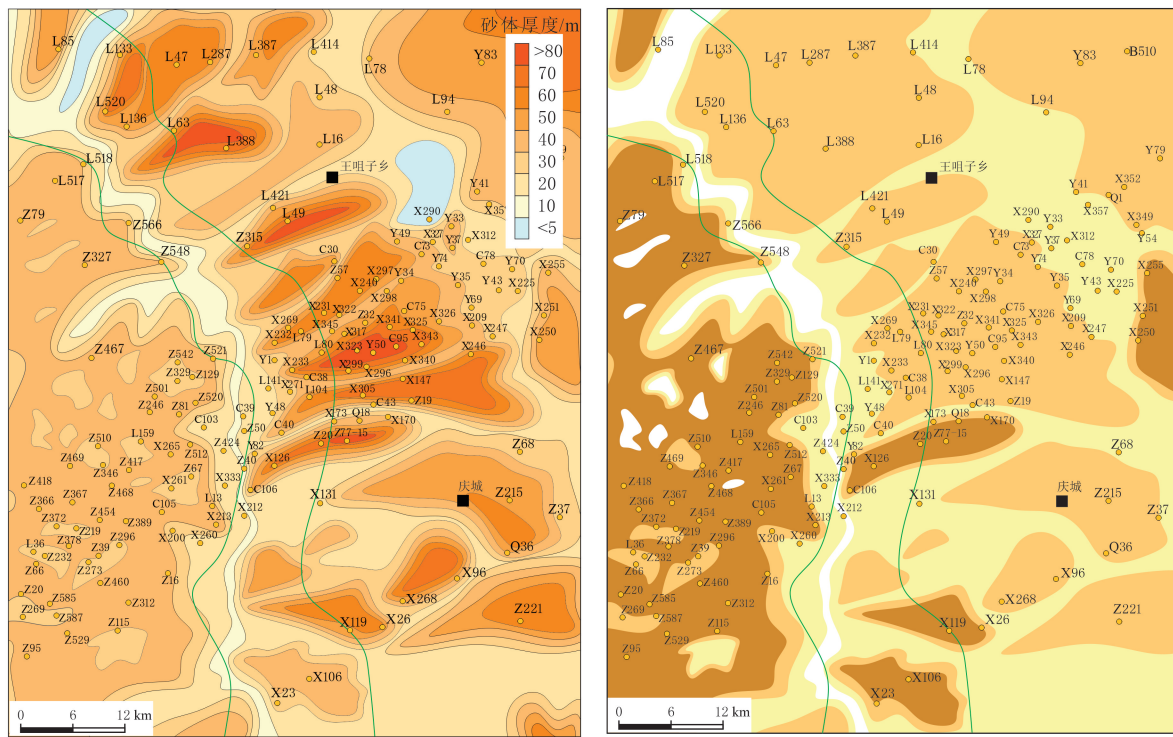


图 9 陇东地区延长组中上段过 Z346—Z520—Y1—X231—X297—Y33—Y79 井油藏剖面(位置见图 1 AA')
in fig. 1 AA')



(a) 沉积相展布特征

(b) 古地貌分布特征



(c) 砂体厚度分布特征

(d) 有利砂体分布

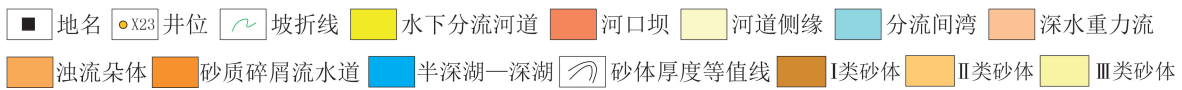


图 10 陇东地区延长组中上段 P3 前积层段有利砂体预测

Fig. 10 Prediction of favorable sand bodies of P3 foreset beds in the middle and upper members of Yanchang Formation in Longdong Area

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中上段前积层段储层主要由岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩及长石砂岩组成,储集空间以压实剩余的原生粒间孔和长石、岩屑等溶蚀孔隙为主,孔隙度相对较低,渗透率非常低,孔隙度与渗透率相关关系差,属于低孔、特低渗的致密储层。

(2)陇东地区延长组中上段前积层段有利砂体的发育受古地貌、沉积相及岩相控制,缓坡带和坳陷带是有利砂体最发育的地貌单元,三角洲前缘水下分流河道和深水重力流砂质碎屑流沉积微相是有利砂体发育的主要相带,块状层理细砂岩相是有利砂体最为发育的岩相类型。

(3)陇东地区延长组中上段前积层段有利砂体分为 I、II 和 III 类, I 类砂体主要分布于缓坡带的水下分流河道微相, II 类砂体主要分布于缓坡带及坳陷带的砂质碎屑流沉积微相, III 类砂体主要分布于斜坡带、坳陷带远端的河道侧缘及浊流沉积微相。

参考文献(References):

- [1] 姚泾利,邓秀芹,赵彦德,等.鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J].石油勘探与开发,2013,40(2):150-158.
YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(2):150-158.
- [2] 付金华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践[J].天然气地球科学,2013,24(6):1091-1101.
FU Jinhua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Geological theory and practice of petroleum exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(6):1091-1101.
- [3] 周翔,何生,陈召佑,等.鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素[J].地球科学,2016,41(6):1055-1066.
ZHOU Xiang, HE Sheng, CHEN Zhaoyou, et al. Characteristics and controlling factors of source rocks in Yanchang Formation sequence framework, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2016,41(6):1055-1066.
- [4] 谭聪,于炳松,阮壮,等.鄂尔多斯盆地西南部延长组高分辨率层序地层划分[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(2):336-347.
TAN Cong, YU Bingsong, RUAN Zhuang, et al. High-resolution sequence stratigraphy division of Yanchang Formation in Southwest Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016,46(2):336-347.
- [5] 吴颖,张金功,尹锦涛,等.鄂尔多斯盆地富黄探区三叠系延长组高分辨率层序地层格架与古地貌恢复[J].西北大学学报(自然科学版),2019,49(1):132-143.
WU Ying, ZHANG Jingong, YIN Jintao, et al. The high resolution sequence stratigraphic framework and palaeo-geomorphologic restoration of Yanchang Formation in Triassic system in Fuhuang Exploration Area of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019,49(1):132-143.
- [6] 惠潇,侯云超,陈修,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组层序地层再认识及地质意义[J/OL].沉积学报,https://link.cnki.net/urlid/62.1038.P.20230906.1933.002:1-20.
HUI Xiao, HOU Yunchao, CHEN Xiu, et al. New insight into sequence stratigraphy and its geological significance in the Yanchang Formation, Longdong Area, Ordos Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, https://link.cnki.net/urlid/62.1038.P.20230906.1933.002:1-20.
- [7] STEEL R J, OLSEN T. Clinoforms, clinoform trajectories and deepwater sands[C]// ARMENTROUT J. Sequence stratigraphic models for exploration and production; evolving methodology, emerging models and application histories. Tulsa; GCSSEPM Proceedings 22nd Annual Conference, 2002:367-381.
- [8] 李慧琼,蒲仁海,王大兴,等.鄂尔多斯盆地延长组地震前积反射的地质意义[J].石油地球物理勘探,2014,49(5):985-996.
LI Huiqiong, PU Renhai, WANG Daxing, et al. Progradational reflection from lacustrine Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014,49(5):985-996.
- [9] RAMON-DUENAS C, RUDOLPH K W, EMMET P A, et al. Quantitative analysis of siliciclastic clinoforms; an example from the North Slope, Alaska[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018,93:127-134.
- [10] ZHANG J Y, OLARIU C, STEEL R, et al. Climatically controlled lacustrine clinoforms: theory and modelling results[J]. Basin Research, 2020,32(2):240-250.
- [11] 李一凡,郭懿莹,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组划分与对比关系再认识[J].沉积学报,2024,42(4):1297-1308.
LI Yifan, GUO Yixuan, YAO Jingli, et al. Reconsideration of division and correlation of the Yanchang Formation in the Southwest Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024,42(4):1297-1308.
- [12] 夏勇,惠潇,赵俊峰,等.鄂尔多斯盆地西南庆城地区延长组前积斜坡生长及其控砂规律[J/OL].沉积学报,https://kns.cnki.net/

- kcms/detail//62.1038.P.20230208.1640.003;1-19.
- XIA Yong, HUI Xiao, ZHAO Junfeng, et al. Clinoform growth and its controls on the distribution of sandstone in the Yanchang Formation, Qingcheng Area, Southwestern Ordos Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//62.1038.P.20230208.1640.003;1-19>.
- [13] 冯雪,高胜利,刘永涛,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组三角洲前缘前积结构特征[J].岩性油气藏,2021,33(6):48-58.
FENG Xue, GAO Shengli, LIU Yongtao, et al. Characteristics of delta front progradation structure of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021,33(6):48-58.
- [14] 惠潇,侯云超,喻建,等.大型陆相拗陷湖盆深湖区前积型地震地层特征及砂体分布规律:以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中段为例[J].沉积学报,2022,40(3):787-800.
HUI Xiao, HOU Yunchao, YU Jian, et al. Progradational seismic strata features and distribution of sandstone in the deep-water area of a large-scale lacustrine depression basin: a case study of the Middle Yanchang Formation in Longdong, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022,40(3):787-800.
- [15] 向晋泰.陇东地区延长组斜坡区古地貌及其沉积充填演化[D].武汉:长江大学,2023:18-38.
XIANG Jinjin. Paleogeomorphology and sedimentary filling evolution of slope area of Yanchang Formation in Longdong Area[D]. Wuhan: Yangtze University, 2023:18-38.
- [16] 薛蓓蓓,郭峰,马旭晴,等.三角洲前缘致密储层特征及其主控因素:以定边地区长6油层组为例[J].桂林理工大学学报,2021,41(4):743-751.
XUE Beibei, GUO Feng, MA Xuqing, et al. Characteristics and main controlling factors of tight reservoir in delta front: a case study of Chang 6 in Dingbian Area, Ordos Basin[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2021,41(4):743-751.
- [17] 郭岭,孙遥,郭峰,等.胡尖山油田延长组长6段三角洲前缘致密砂岩储层特征及其主控因素[J].河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(4):76-85.
GUO Ling, SUN Yao, GUO Feng, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir in delta front facies in Chang 6 Member of Yanchang Formation, Hujianshan Oilfield[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2023,42(4):76-85.
- [18] 刘桂珍,孙毛宁,叶凯,等.鄂尔多斯盆地延长组储层质量差异化和影响因素[J].新疆地质,2023,41(4):562-569.
LIU Guizhen, SUN Maoning, YE Kai, et al. Differences in reservoir quality and influencing factors of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2023,41(4):562-569.
- [19] 李凤杰,王多云,徐旭辉.鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组储层特征及影响因素分析[J].石油实验地质,2005,27(4):365-370.
LI Fengjie, WANG Duoyun, XU Xuhui. The influential factors and characteristics of Triassic Yanchang Formation reservoir in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005,27(4):365-370.
- [20] 付晶,吴胜和,李桢,等.陇东地区延长组层序格架内储层质量差异及其控制因素[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(8):3293-3301.
FU Jing, WU Shenghe, LI Zhen, et al. Differences and controlling factors of reservoir quality within sequence stratigraphic framework of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2013,44(8):3293-3301.
- [21] 吴旭光.鄂尔多斯盆地西南部延长组储层物性特征及其控制因素:以陇东地区长3、长4+5油层组为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(6):1-5.
WU Xuguang. Physical property characteristics of Yanchang Formation reservoir in the southwest of Ordos Basin and their controlling factors: taking Chang 3 and Chang 4+5 reservoirs in Longdong Area as an example[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2014,29(6):1-5.
- [22] 李盼盼,朱筱敏,朱世发,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长4+5油层组储层特征及主控因素分析[J].岩性油气藏,2014,26(4):50-56.
LI Panpan, ZHU Xiaomin, ZHU Shifa, et al. Characteristics and main controlling factors of Chang 4+5 oil reservoir set in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014,26(4):50-56.
- [23] 赵文智,胡素云,李建忠,等.我国陆上油气勘探领域变化与启示:过去十余年的亲历与感悟[J].中国石油勘探,2013,18(4):1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LI Jianzhong, et al. Changes and enlightenment of onshore oil/gas exploration domain in China: experience and perception in the past decade[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013,18(4):1-10.
- [24] 何登发,李德生,童晓光,等.中国沉积盆地油气立体综合勘探[J].石油与天然气地质,2021,42(2):265-284.
HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(2):265-284.
- [25] 李凤杰,王多云,张庆龙,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析[J].沉积学报,2006,24(4):549-554.

- LI Fengjie, WANG Duoyun, ZHANG Qinglong, et al. Sedimentary facies characteristic and sequence stratigraphy analysis of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006,24(4):549-554.
- [26] 陈洪德,倪新锋. 陇东地区三叠系延长组沉积层序及充填响应特征[J]. *石油与天然气地质*, 2006,27(2):143-151.
CHEN Hongde, NI Xinfeng. Depositional sequence and filling response characteristics of Triassic Yanchang Formation in Longdong Area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006,27(2):143-151.
- [27] 付金华,郭正权,邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2005,7(1):34-44.
FU Jinhua, GUO Zhengquan, DENG Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in Southwestern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005,7(1):34-44.
- [28] 张家明,刘东悦,张妍煜,等. 深层页岩高分辨率层序地层控制的非均质性特征及其与含气性的关系:以渝西地区 Z203 井为例[J]. *非常规油气*, 2023,10(1):52-60.
ZHANG Jiaming, LIU Dongyue, ZHANG Yanyu, et al. Heterogeneity characteristics of high-resolution sequence stratigraphic control in deep shale and its relationship with gas-bearing: a case study of the well Z203 in Western Chongqing Area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023,10(1):52-60.
- [29] 孙少川,李令喜,刘懿,等. 基于地震沉积学的古河道展布特征与演变过程:以川东北通南巴背斜中下侏罗统为例[J]. *东北石油大学学报*, 2021,45(3):62-72.
SUN Shaochuan, LI Lingxi, LIU Yi, et al. Distribution characteristics and evolution of ancient river channels based on seismic sedimentology: a case study of the Middle-Lower Jurassic in the Tongnanba Anticline, Northeastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(3):62-72.
- [30] 任艳,孙乐,房茂军,等. 北部湾盆地乌石凹陷始新统层序地层分析[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(6):26-39.
REN Yan, SUN Le, FANG Maojun, et al. Sequence stratigraphic analysis of the Eocene in Wushi Sag, Beibuwan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(6):26-39.
- [31] 冉新权,吴胜和,付晶,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组低渗透储层孔隙结构分类研究[J]. *地质前缘*, 2013,20(2):77-85.
RAN Xinquan, WU Shenghe, FU Jing, et al. Research on the pore structure classification of low permeability reservoir of the Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013,20(2):77-85.
- [32] 杨华,钟大康,姚涪利,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩储层孔隙成因类型及其控制因素[J]. *地质前缘*, 2013,20(2):69-76.
YANG Hua, ZHONG Dakang, YAO Jingli, et al. Pore genetic types and their controlling factors in sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013,20(2):69-76.
- [33] 吴浩,郭英海,张春林,等. 致密油储层微观孔吼结构特征及分类:以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠统延长组长 7 段为例[J]. *东北石油大学学报*, 2013,37(6):12-17.
WU Hao, GUO Yinghai, ZHANG Chunlin, et al. Characteristics and classifications of micro-pore structure in tight oil reservoir: a case study of the Triassic Yanchang Formation Chang 7 in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2013,37(6):12-17.
- [34] 周勇,徐黎明,纪友亮,等. 致密砂岩相对高渗透层特征及分布控制因素研究:以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 8₂ 为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017,46(1):106-120.
ZHOU Yong, XU Liming, JI Youliang, et al. Characteristics and distributing controlling factors of relatively high permeability reservoir: a case study from Chang 8₂ sandstones of Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017,46(1):106-120.
- [35] 吕天雪,张国一,易立新,等. 松辽盆地低渗透储层孔隙结构及分形特征[J]. *特种油气藏*, 2022,29(1):59-65.
LYU Tianxue, ZHANG Guoyi, YI Lixin, et al. Pore structure and fractal characteristics of low-permeability reservoirs in Songliao Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022,29(1):59-65.
- [36] 孟婧,张莉莹,李芮,等. 致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J]. *特种油气藏*, 2023,30(4):71-78.
MENG Jing, ZHANG Liying, LI Rui, et al. Microscopic pore structure characteristics of tight sandstone reservoirs and its classification evaluation[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023,30(4):71-78.
- [37] 杨晶,岳庆友,蒋睿,等. 德惠断陷营城组火山岩储层特征及主控因素[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2023,43(3):41-46.
YANG Jing, YUE Qingyou, JIANG Rui, et al. Characteristics and main controlling factors of volcanic rock reservoirs in Yingcheng Formation of Dehui Fault Depression[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2023,43(3):41-46.
- [38] 陈延芳,杜晓峰,王清斌,等. 渤海黄河口中洼古地貌对沉积相的控制作用[J]. *东北石油大学学报*, 2018,42(5):35-43.
CHEN Yanfang, DU Xiaofeng, WANG Qingbin, et al. Control of sedimentary facies in paleotopography over the middle sag of Huanghekou in Bohai[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018,42(5):35-43.
- [39] 赵帅,解习农,刘中戎,等. 古地貌对断陷盆地沉积体系的控制作用:以青藏高原伦坡拉盆地始新统牛堡组为例[J]. *地质科技情报*, 2019,38(2):53-64.

- ZHAO Shuai, XIE Xinong, LIU Zhongrong, et al. Control of tectonic-palaeogeomorphology on deposition system of faulting-subsiding basin: a case from the Eocene Niubao Formation in Lunpola Basin, Central Tibet[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019,38(2):53-64.
- [40] PASHIN J C, RINDSBERG A K. Tectonic and paleotopographic control of basal Chesterian sedimentation in the Black Warrior Basin of Alabama[J]. *AAPG Bulletin*, 1993,43:291-304.
- [41] LEMONS D R, CHAN M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of Late Pleistocene Lake Bonneville, Northern Utah and Southern Idaho[J]. *AAPG Bulletin*, 1999,83(4):635-665.
- [42] CATHER S M, CONNELL S D, CHAMBERLIN R M, et al. The chuska erg: paleogeomorphic and paleoclimatic implications of an Oligocene sand sea on the Colorado Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008,120(1/2):13-33.
- [43] VAN DER MERWE W C, HODGSON D M, BRUNT R L, et al. Depositional architecture of sand-attached and sand-detached channel-lobe transition zones on an exhumed stepped slope mapped over a 2 500 km² area[J]. *Geosphere*, 2014,10(6):1076-1093.
- [44] BROOKS H L, HODGSON D M, BRUNT R L, et al. Deep-water channel-lobe transition zone dynamics: processes and depositional architecture, an example from the Karoo Basin, South Africa[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2018,130(9/10):1723-1746.
- [45] KNELLER B. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction[J]. *Geological Society Special Publication*, 1995,94(1):31-49.
- [46] KNELLER B C, BENNETT S J, MCCAFFREY W D. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1999,104(C3):5381-5391.
- [47] STEVENSON C J, TALLING P J, WYNN R B, et al. The flows that left no trace: very large-volume turbidity currents that bypassed sediment through submarine channels without eroding the sea floor[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2013,41:186-205.
- [48] 蔡全升,胡明毅,胡忠贵,等. 退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律:以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016,37(6):903-914.
- CAI Quansheng, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: a case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Linjiang Area, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016,37(6):903-914.
- [49] 王兴龙,刘磊,林良彪,等. 川西拗陷新场地区须二段沉积微相与砂体展布[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021,48(1):23-34.
- WANG Xinglong, LIU Lei, LIN Liangbiao, et al. Sedimentary micro-facies and distribution of sand bodies in the 2nd member of Xujiahe Formation, Xinchang Area, Western Sichuan Depression, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2021,48(1):23-34.

.....

(上接第44页)

- [38] 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.
- [39] 王香增,高胜利,张丽霞,等. 延长油田延长组下部油藏与构造的耦合作用及勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2012,34(5):459-465.
- WANG Xiangzeng, GAO Shengli, ZHANG Lixia, et al. Coupling of reservoirs and structures and exploration targets in Lower Yanchang Formation of Triassic, Yanchang Oilfield[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012,34(5):459-465.
- [40] 刘池洋,王建强,张东东,等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点[J]. *石油与天然气地质*, 2021,42(5):1011-1029.
- LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(5):1011-1029.