

陆相混积细粒储集岩岩相构型及其对甜点的控制作用

——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例

印森林¹, 陈恭洋¹, 许长福², 熊先钺³, 赵军², 胡可²

(1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国石油 新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 中国石油 煤层气有限责任公司, 北京 100028)

摘要:就陆相中高成熟度混积型页岩油开发而言,岩相对甜点的控制作用还不明确。以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例,利用岩相构型分析、无人机倾斜摄影和三维地质建模等方法,结合岩心、露头、测井、分析化验和试油动态等资料,开展了岩相构型对甜点控制作用的研究。结果表明,把传统人工考察与无人机倾斜摄影技术结合起来,从井点设置、岩相参数定量刻画、格架模型和三维岩相原型模型建立等方面出发,可以表征芦草沟组露头剖面岩相构型三维空间分布特征。混积细粒储集岩岩相构型组合主要有渐变型、突变型和特殊型3类:渐变型砂体发育程度较高,形成上、下对称状岩相构型,常表现为多个相似旋回的叠置,烃源岩优质,储集层溶蚀孔隙发育,是优质甜点;突变型砂体发育程度一般,形成非对称状岩相构型,常呈多个相似旋回的叠置,烃源岩较为优质,储集层厚度薄;特殊型属于厚层碎屑岩类型,砂体发育程度高,呈单一旋回砂体叠置,储层较为致密,为相对优质甜点。储集岩岩相构型控制了甜点分布,并影响着开发部署策略。渐变型甜点发育程度高,非均质性弱,开发效果最好,采用大规模水平井平台化作业进行效益开发;突变型非均质性强,开发效果一般,是后续接替区域;特殊型整体呈分散状,连续性较差,非均质性强,需精细研究岩相构型空间分布,结合核磁共振法所测的物性参数和含油气性参数部署水平井开发。

关键词:混积细粒岩;岩相构型;无人机;储层甜点;页岩油;芦草沟组;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed reservoirs and its control over sweet spot: A case study of Permian Lucaogou Formation shale oil reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin

Yin Senlin¹, Chen Gongyang¹, Xu Changfu², Xiong Xianyue³, Zhao Jun², Hu Ke²

(1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 2. Xinjiang Oil Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 3. Coalbed Methane Company, PetroChina, Beijing 100028, China)

Abstract: The lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed siliciclastic-carbonate reservoirs is suggested to have certain control over the distribution of sweet spot of medium- to high-mature shale oil. But how exactly the mechanism works is still not clear. To tackle the issue, a case study is performed on the Permian Lucaogou Formation shale reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin. Core and outcrop observation, logging data, lab test and production test are integrated to analyze the control of lithofacies architecture upon the distribution of sweet spots and its role in formulating development strategy. During the process, technologies including lithofacies architecture analysis, drone (or unmanned aerial vehicle) photography and 3D geologic modeling are used. The results show that combining the traditional outcrop observation measures with drone photography can be very useful in representing the lithofacies architecture features of the outcrops as the technology facilitates the well setting optimization, quantitative litho facies delineation with parameters, framework modeling and 3D lithofacies modeling. The lithofacies architecture patterns of

收稿日期:2021-11-05;修订日期:2022-07-12。

第一作者简介:印森林(1983—),男,博士、副教授、博士生导师,油气田开发地质。E-mail: yinxiang_love@qq.com。

通讯作者简介:陈恭洋(1963—),男,博士、教授、博士生导师,石油地质。E-mail: gychen8888@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008-006-004-002);国家自然科学基金项目(41502126);长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(2019KFJJ0818022)。

this fine-grained mixed siliciclastic-carbonate reservoirs can be classified into three types, including the gradational, abrupt and special patterns. The gradational pattern, which usually indicates the occurrence of quality sweet spots, tends to be longitudinally symmetric and contains well-developed sandbodies mostly in a superimposition of multiple similar cycles with high quality source rocks and reservoirs with well-dissolved pores. The abrupt pattern hosts medium-developed sandbodies in an asymmetric architecture with a superimposition of several similar cycles. The source rocks are fine but reservoirs are thin. The special pattern is mostly thick clastic rocks with well-developed sandbodies in superimposed single cycles, which contain tight reservoirs and less fine sweet spots. The lithofacies architecture patterns control the distribution of sweet spots and shall be seriously considered during development planning for the formation. The gradational architecture pattern with well-developed sweet spots, is less heterogeneous and can be easily and economically tapped with pad drilling. The abrupt architecture pattern is the second-best choice due to their strong heterogeneity. The special architecture pattern features in scattered and discontinuous distribution of sweet spots as well as strong heterogeneity, thus is comparatively the worst development targets. A fine study of the spatial distribution of the lithofacies architecture may be needed before any development plan being drawn.

Key words: fine-grained mixed siliciclastic-carbonate rocks, lithofacies architecture, drone, sweet spot, shale oil, Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Juggar Basin

引用格式:印森林,陈恭洋,许长福,等. 陆相混积细粒储集岩岩相构型及其对甜点的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1180–1193. DOI: 10. 11743/ogg20220514.

Yin Senlin, Chen Gongyang, Xu Changfu, et al. Lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed reservoirs and its control over sweet spot: A case study of Permian Lucaogou Formation shale oil reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1180–1193. DOI: 10. 11743/ogg20220514.

岩相构型(lithofacies architecture)是指不同类型岩石相在三维空间的组合与叠置关系^[1]。随着中国陆相页岩油气勘探开发的不断深入^[2-4],与页岩岩相相关的细粒沉积学逐步成为研究的热点^[5-7]。根据细粒沉积岩的物质组成类型,可以划分出碳酸盐质细粒沉积岩、长英质细粒沉积岩、粘土质细粒沉积岩和混合型细粒沉积岩。细粒沉积岩在沉积过程中和沉积后经历了物理、化学和生物过程的相互作用,导致其颗粒结构、堆积模式、与有机质的共存关系和成岩演化途径发生差异化,物理属性和烃类富集能力大相径庭^[8-11]。学者研究表明,细粒沉积岩岩相及其组合特征研究对页岩油理论和实践意义重大^[12-17]。就当前中高成熟度页岩油评价与效益开发来说^[18-21],甜点储层的岩性以厚层泥页岩夹薄层偏粗粒储集岩为主^[22],其“七性参数”差异性明显^[23],导致在压裂后表现出不同的生产特征^[24]。

研究发现,页岩油产能受储集岩相及其空间组合控制十分明显。当前,陆相页岩油岩相构型研究进展主要有如下几个方面。其一是源-储一体岩相构型分类,从页岩油气成藏角度把页岩层系源-储组合类型划分为源-储一体、源-储分离、纯页岩型3类^[25],按照页岩层系热演化程度把其划分为中高成熟度和中低成熟度2种类型,并对应开展了页岩油富集特征及机

理的研究^[26-29]。其二是细粒页岩油储层岩相构型相关研究,初步揭示了微观岩心尺度富有机质页岩层系中的纹层等岩相类型与组合、储集空间特征及页岩油富集模式等^[30-34]。但是专门针对混积细粒储集岩岩相组合及成因机制^[35],特别是开发地质方面的研究还十分薄弱。迫切需要开展混积细粒储集层非均质性研究,探索储集岩岩相对页岩油甜点的控制作用,这不仅对深化混积细粒岩沉积学理论具有重要的意义,而且对页岩油高效开发具有重要实践意义。

1 区域地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部,西临三台凸起,东接古西凸起,南以阜康断裂带为界,北以沙奇凸起为界,为中石炭统褶皱基底上发展起来呈西断东超的箕状凹陷,整体由东向西倾斜,地层自西向东逐渐减薄(图1a)。吉木萨尔凹陷中二叠世为近海湖泊环境,间歇性海水注入使湖泊生物群体死亡,有机质发育程度高,发育了一套由咸化湖泊准同生期白云石化作用、火山及陆源碎屑沉积作用形成的混积岩^[36]。具有岩性多变、矿物成分多样、普遍含白云石、多为过渡岩类的特点^[37-40],面积为1 278 km²,厚度为50~160 m(图1b)。不同类型岩性互层状纵向组合,总有机碳含量

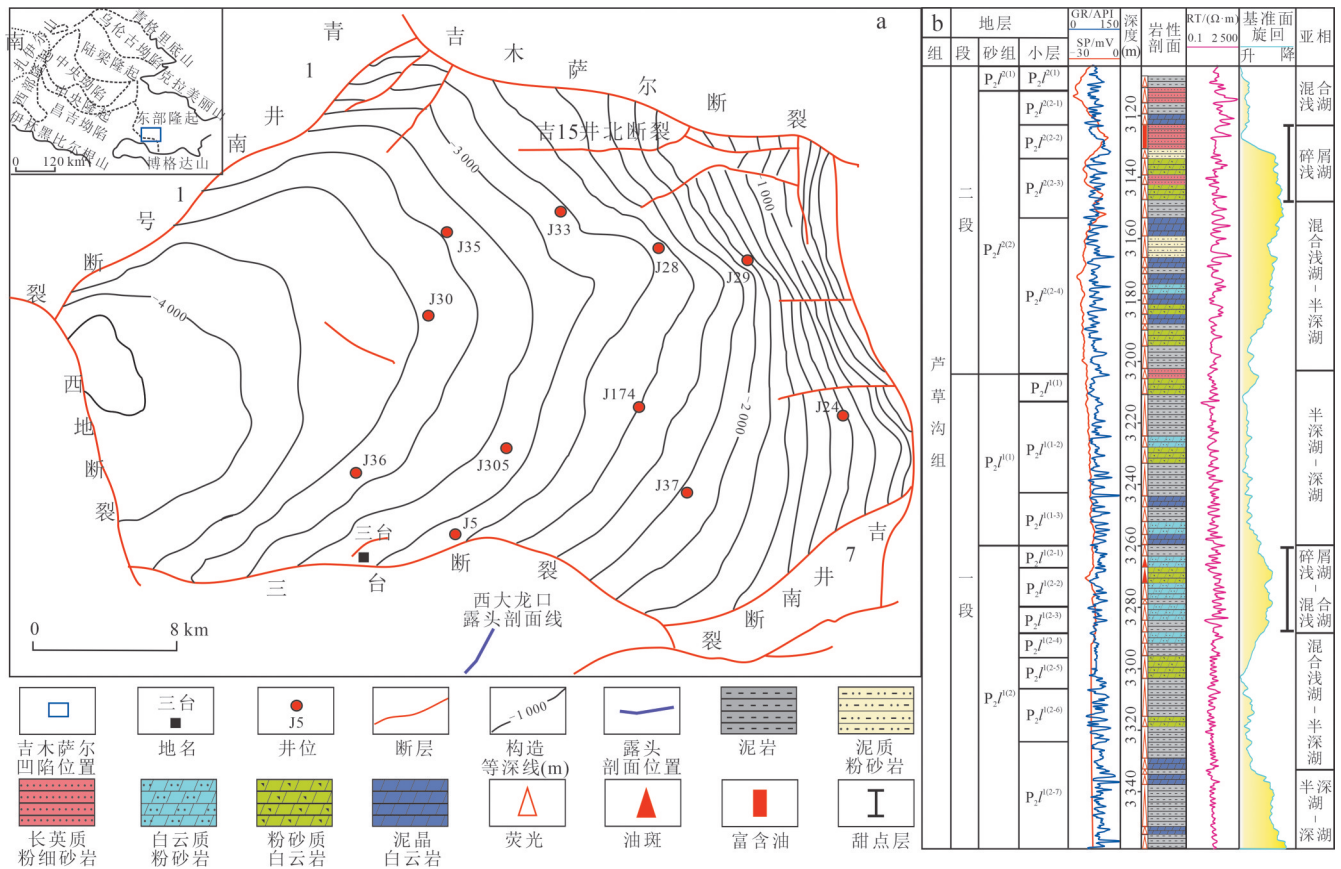


图1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Location map and composite stratigraphic column of the Jimsar Sag, Junggar Basin

a. 研究区位置及构造; b. 芦草沟组综合柱状图

(TOC)多大于3.5%,以Ⅱ型干酪根为主,镜质体反射率(R_0)为0.6%~1.1%。与普通裂缝性油藏不同^[41],这种混积细粒储层发育溶孔、晶间孔和微裂缝等。孔隙度主体为6%~14%,空气渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含油饱和度为80%~90%,脆性矿物含量在85%以上,以常压-弱超压为主,原油密度平均为 $0.88 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$,地层条件下的原油流动性较差。目的层芦草沟组自下而上分为芦一段(P_2l^1)与芦二段(P_2l^2),细分为 $P_2l^{1(1)}$, $P_2l^{1(2)}$, $P_2l^{2(1)}$ 以及 $P_2l^{2(2)}$ 4个砂组。主力储层为上、下两套“甜点层”,“下甜点层”($P_2l^{1(2)}$)平均厚度为38.4 m,细分为 $P_2l^{1(2-1)}$, $P_2l^{1(2-2)}$, $P_2l^{1(2-3)}$, $P_2l^{1(2-4)}$, $P_2l^{1(2-5)}$, $P_2l^{1(2-6)}$ 和 $P_2l^{1(2-7)}$ 7个小层,岩性主要为白云质粉砂岩;“上甜点层”($P_2l^{2(2)}$)平均厚度为24.8 m,细分为 $P_2l^{2(2-1)}$, $P_2l^{2(2-2)}$, $P_2l^{2(2-3)}$ 和 $P_2l^{2(2-4)}$ 4个小层,岩性主要为长英质粉砂岩、白云质粉砂岩、粉砂质白云岩(图1b)。

文章以吉木萨尔凹陷芦草沟组为研究对象,结合盆地边缘出露良好的西大龙口露头,以及丰富的油田开发资料,诸如约90口直井和30口水平井资料,44口取心井长约1300 m的岩心,3口全井段取心井长约

600 m的岩心及其对应的分析化验资料,开展本次研究。

2 混积细粒岩岩相构型及其组合特征

2.1 无人机倾斜摄影露头精细表征与原型模型

2.1.1 露头区概况

西大龙口剖面地处新疆维吾尔自治区吉木萨尔县城以西约10 km处,东经 $88^\circ 51' 52.23''$,北纬 $43^\circ 57' 31.64''$,属于博格达山北缘推覆构造带的组成部分。东部与北边的克拉美丽山相连,北部与准噶尔盆地相接,南部和博格达山毗邻,紧挨吐鲁番哈密盆地,高程在1.1 km左右(图2a)。露头区内大龙口剖面由南向北地层由老变新,依次出露中二叠统芦草沟组(P_2l)、红雁池组(P_2h),上二叠统泉子街组(P_3q)、梧桐沟组(P_3wt)、锅底坑组(P_3g),下三叠统韭菜园组(T_3j)、烧房沟组(T_3sf),中三叠统克拉玛依组(T_2k),以及上三叠统黄山街组(T_3hs)和郝家沟组

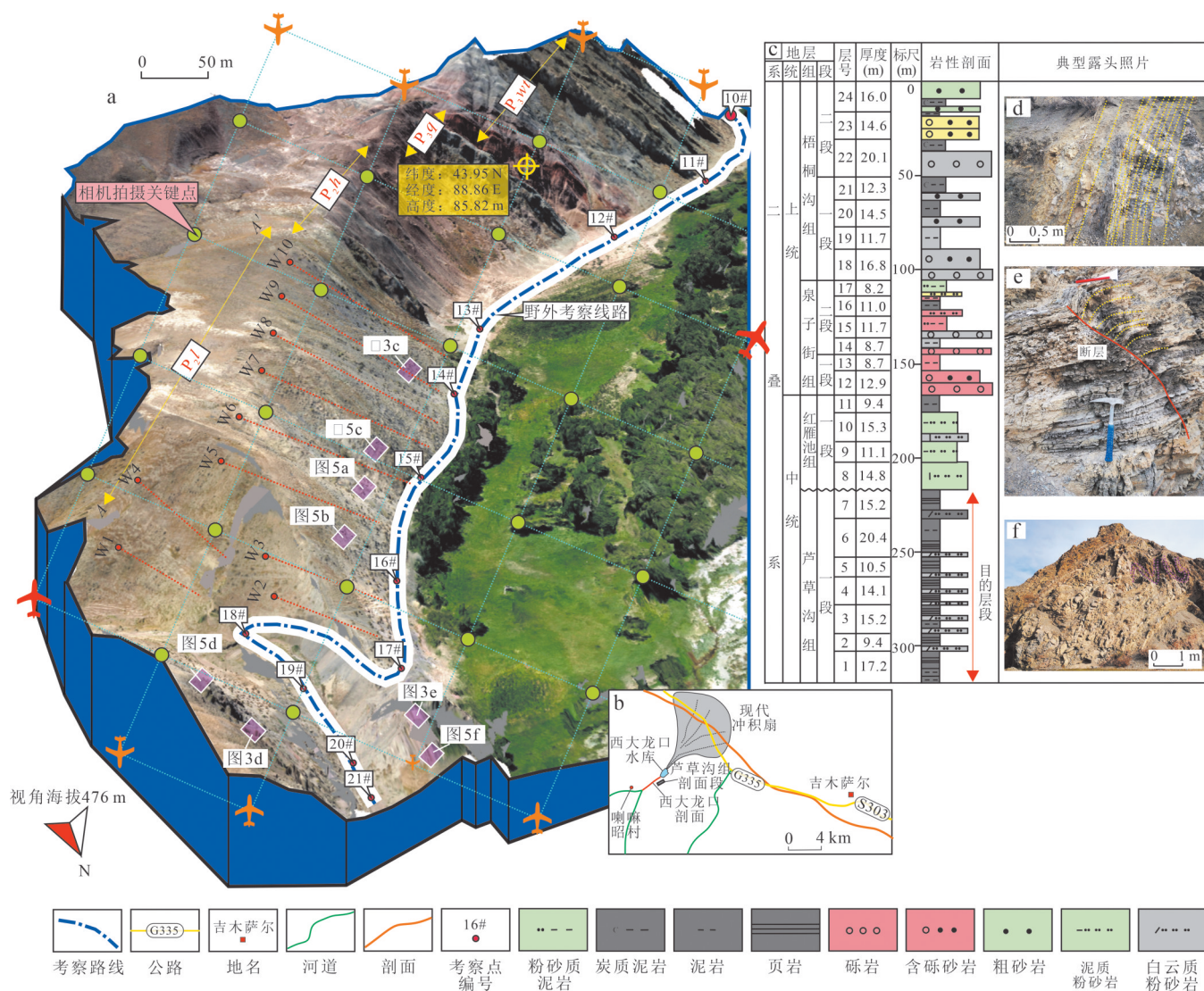


图3 无人机倾斜摄影准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组模型及岩相分布

Fig. 3 Model and lithofacies of the Lucaogou Formation from a 3D UAV photography, Jimsar Sag, Junggar Basin

a. 无人机倾斜摄影可视化模型; b. 无人机数据采集位置; c. 目的层岩性柱状图; d—f. 典型岩相与沉积构造

构造模型建立和三维岩相模型建立等步骤^[46]。其中,本次岩相构型建模主要采用基于定量知识库约束的随机建模方法与人-机交互实现(图4)。

依据图3出露较好的位置设置10个井点数据(W1, W2, …, W10),同时为了更好地保持野外地层产状,增加了12个井点,即X1, X2, …, X12,通过建立格架模型-岩相模型的思路开展了露头三维模型研究,对剖面进行了岩相识别与表征。通过输入10个井点的岩相数据,利用序贯指示模拟方法建立露头三维岩相模型。详细观察露头,发现储集岩岩相分布厚度较薄,然而岩相的侧向分布较为稳定,在研究区范围内沿地层走向其厚度几乎不变。随后,按照岩相出露特点,结合单井岩相数据进行人工后处理,得到最终三维模型。模型显示粉砂质白云岩相主要分布在底部和顶

部,顶部发育程度高,而泥晶/微晶白云岩相主要分布在顶部,白云质粉砂岩相主要分布在底部,长英质粉砂岩则分布在中部与底部。模型较好地呈现了岩相单元的空间形态及叠置关系(图4)。泥质粉砂岩相厚度在1~3 m不等;泥晶白云岩相厚度为1.5~3.5 m;白云质粉砂岩相厚度为0.5~1.5 m,大部分在1.0 m左右;粉砂质白云岩相厚度为0.8~2.0 m,普遍在1.2 m左右;长英质粉砂岩相厚度为0.8~2.0 m,大部分在1.2 m左右。

2.2 混积细粒储集岩岩相构型组合

依据露头区详细考察,结合地下生产开发的储集体特征,按照岩相与测井响应等划分出3类典型岩相构型组合,包括渐变型、突变型和特殊型。不同类型差

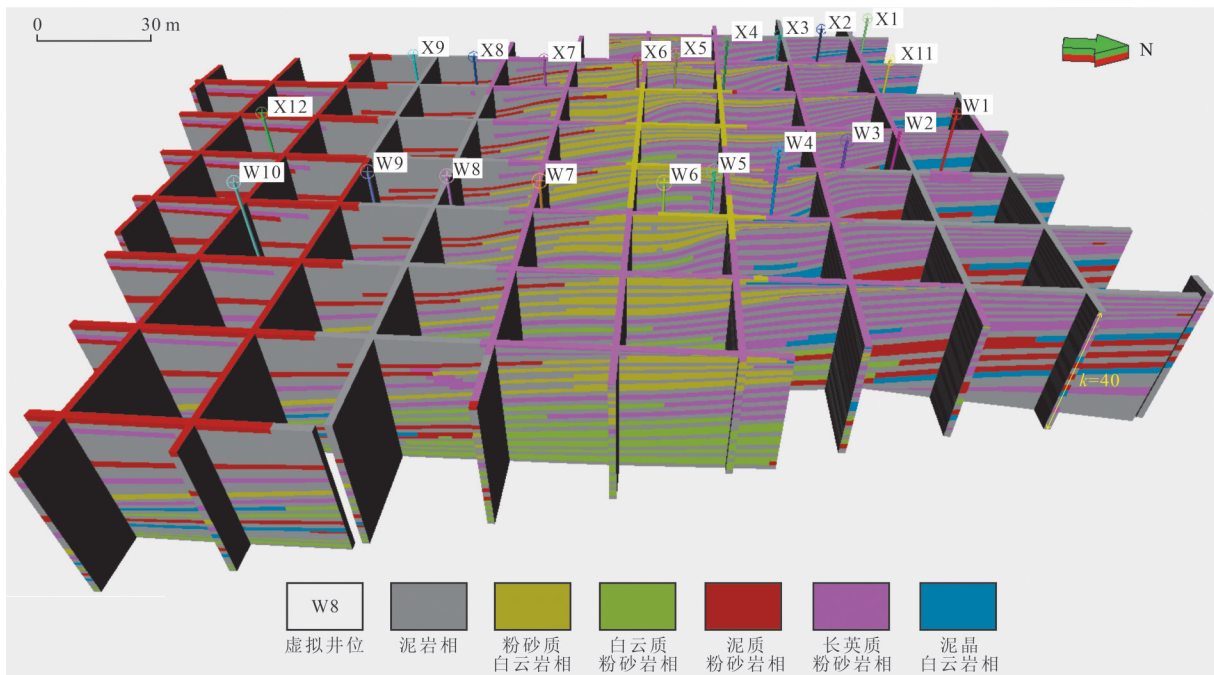


图4 吉木萨尔凹陷西大龙口剖面露头区芦草沟组三维岩相分布模型

Fig. 4 3D lithofacies distribution of the Lucaogou Formation in Xidalongkou outcrop section, Jimusar Sag, Junggar Basin

异较大,而且对后期生产开发方式的选取也有很大影响。

2.2.1 渐变型

渐变型由水平状泥岩相—纹层状长英质粉砂岩相—水平状白云质粉砂岩相—水平状长英质粉砂岩相—水平状泥岩相组成。储集岩相发育程度较高,形成上下对称状岩相构型(图5a),储集层厚度为0.5~1.5 m,烃源岩厚度较大,为8~10 m。上、下部为水平状泥岩相,呈厚层状,厚度一般大于1.5 m;水平状长英质粉砂岩相,呈薄层状,厚度一般为0.3~0.5 m,泥质含量较高,为相对较差储集层(图5b);水平状白云质粉砂岩相厚度约为0.8 m,泥质含量低,常有溶蚀孔隙,为优质储层。渐变型岩相组合为典型混合浅湖相带形成的混合坪微相,主要是陆源碎屑岩和碳酸盐岩的混合沉积,其构成的基准面旋回表现出先快速上升后缓慢下降、再缓慢上升后快速下降的对称特征。这种类型在露头区较为常见,呈多个相似旋回的叠置。

2.2.2 突变型

突变型主要包括两种类型。其一是由水平状泥晶/微晶云岩相—水平状粉砂质白云岩相—水平状泥晶/微晶云岩相组成,其中泥晶/微晶云岩相泥质含量整体较高,也是一类高效烃源岩,粉砂质白云岩相为

储集岩相。其二是由水平状泥岩相—水平状白云质粉砂岩相—水平状泥岩相组成(图5c,d)。相对粗粒岩性发育程度一般,形成非对称状岩相构型。源岩厚度较大,为8~10 m,储集层厚度为0.5~1 m(图5e)。下部水平状泥岩相呈厚层状,厚度一般大于1.5 m,泥岩为烃源岩;水平薄层状白云质粉砂岩相厚度约为0.3~0.5 m;水平状白云质粉砂岩相厚度约为0.5 m,泥质含量低,溶蚀孔隙发育,为优质储层。渐变型岩相为典型的在混合浅湖相带中发育的以白云岩沉积为主的云坪微相或者是以碎屑岩沉积为主的浅湖砂坝微相,其构成的基准面旋回表现出先快速上升后缓慢下降的非对称特征,是露头区较为常见类型,常呈多个相似旋回的叠置。

2.2.3 特殊型

除上述两种类型外,研究区还发育一类重要的特殊岩相组合,属于混积岩中相对独立的厚层类型,其主要是由细粒碎屑岩构成,典型岩性为长英质粉砂岩。特殊型主要由水平状/纹层状泥岩相—块状长英质粉砂岩相—水平/纹层状泥岩相组成(图5f),其砂体发育程度很高,为厚层(3~8 m)块状长石岩屑砂岩相类,夹不等厚泥质隔夹层(0.2~1.5 m),是相对优质储层。与致密储层类似,特殊型上、下均为叠置的泥岩相烃源岩,其厚度为0.5~1.5 m。该岩相组合为典型碎屑浅湖相带的浅湖砂坝微相,其构成的基准旋回呈先快速

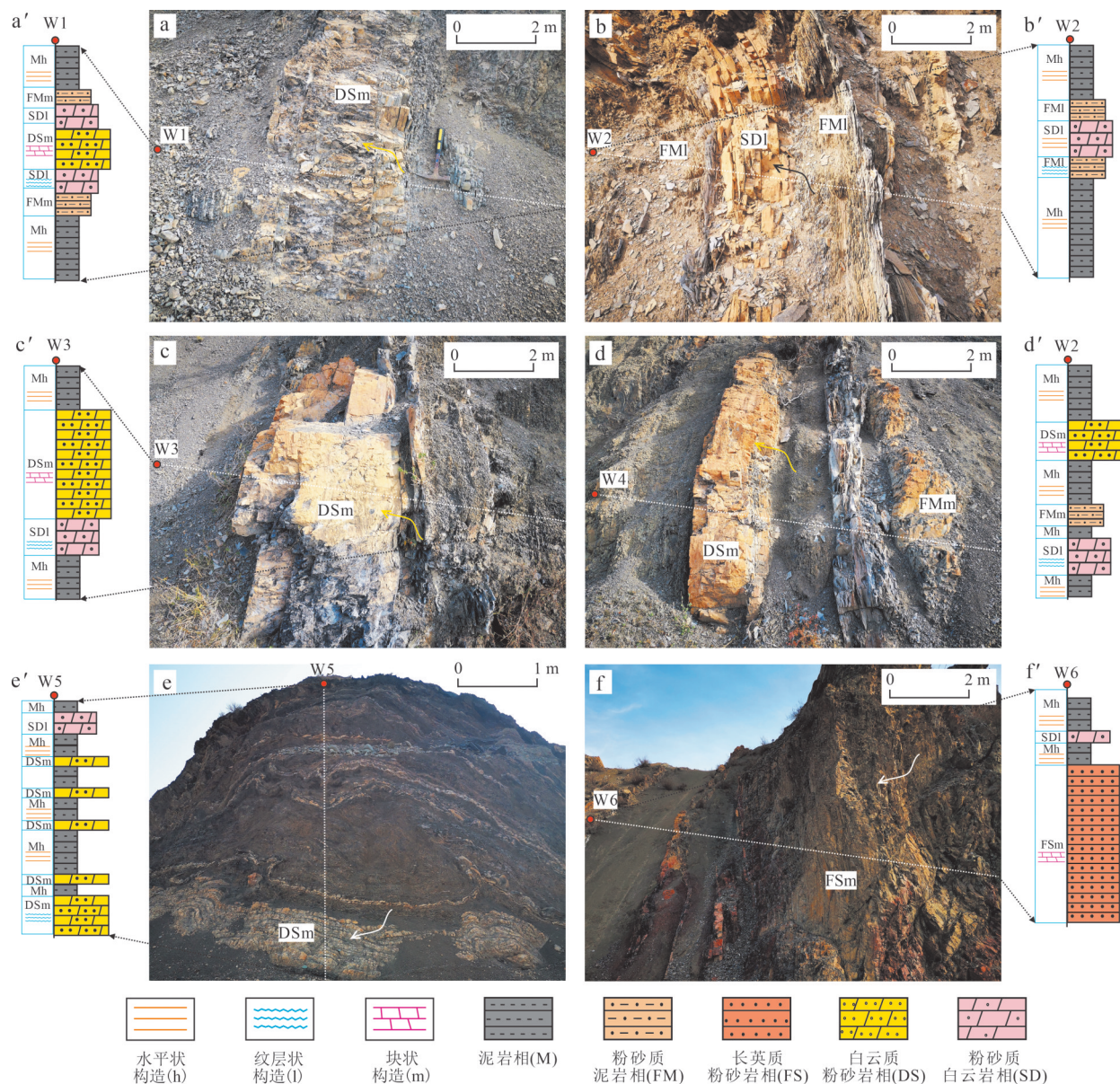


图5 吉木萨尔凹陷西大龙口剖面野外露头不同岩相构型模式

Fig. 5 Different lithofacies architecture patterns on Xidalongkou outcrop, Jimsar Sag, Junggar Basin

a, b. 渐变型; c—e. 突变型; f. 特殊型; a'—f'. 各类型岩相柱状图

上升、后快速下降、再快速上升的特征。研究区这类岩相构型为厚度较大的碎屑岩类岩相,最早受到关注,也是研究区开发的主要对象,形成的油藏更加接近致密油藏。岩心与测井标定发现, $P_2^{l^{(2-2)}}$ 内部发育了多个泥质夹层,单个夹层厚度在0.2~0.5 m,少数井内夹层的总厚度可达4~5 m。

3 混积细粒储集岩岩相构型空间分布

混积细粒岩看似均质性沉积体,实际在开发中表现出的差异性十分明显。露头的岩相组合样式和分布特征对指导钻井意义十分重大,其一是前述渐变型、突

变型和特殊型组合样式恰是研究区开发过程中面对的3种典型类型;其二是其相对稳定的空间分布特点,是开展地下预测的基础和依据。利用三孔隙度曲线(密度、声波和中子)结合自然伽马与电阻率曲线,建立了研究区的单井岩性解释模型。解释依据主要是不同类型孔隙度曲线,在标准化后对区别白云石、石英和长石等矿物比较敏感,而研究区发育的特殊厚层砂岩可以用自然伽马极高值(含钾长石)来识别。另外,结合3条电阻率曲线的幅度差异可以对粒度粗细进行判断。对研究区80口井开展了单井岩相精细解释,与XRD分析化验对比符合率为85%。

与常规油藏的碎屑岩或者碳酸盐岩岩相不同,研

究区内混积岩岩相类型砂地比或者灰岩与白云岩厚度比的概念地质意义不明确。到油藏开发阶段后,需针对研究区各类储集岩相进行单独的平面分布研究。因此,在单井岩相解释基础上,分别提取单井各个小层不同岩相的厚度值,井间则利用最小二乘法插值后,再结合手工局部调整得到不同小层各类岩相厚度等值线平面分布图(图6,图7);因单一微相单元的分布范围大于研究区平均井距(约500 m),因此预测结果较为可靠。另外,剖面上,依据前述单井岩相解释结果,在露头岩相展布形态、规模和样式指导下,开展不同层的岩相连井对比分析(图6,图8)。研究表明,储集类岩相的平面和剖面分布特征差异很大,展示了研究区页岩油储层强烈的非均质性。

渐变型组合以下甜点层 $P_2l^{(2-2)}$ 为代表,是当前研究区页岩油开发的主力目的层,平面上主要发育砂质

白云岩相、白云质粉砂岩相和长英质粉砂岩相。长英质粉砂岩相厚度为2.0~3.5 m,在西部和中部有2块呈大面积连片状分布,而在其他区域发育程度较低(图6a)。白云质粉砂岩相厚度为5~10 m,有4块呈大面积连片分布,东部呈局部分散状分布(图6b)。粉砂质白云岩相厚度为2.5~4.5 m,有3~4块呈连片状分布,最大的一块位于西部(图6c)。剖面上以泥岩相—白云质粉砂岩相—砂质白云岩相—白云质粉砂岩相—泥岩相的渐变组合为主,分布在研究区的中部—西北部。此外还存在泥岩相—长英质粉砂岩相—粉砂质白云岩相—长英质粉砂岩相—泥岩相的渐变组合,分布在研究区西部和西南部,其次在中东部(图6d)。这3种典型储集岩相主要在研究区的中北部与东南部叠置(图6)。

突变型组合以上甜点层 $P_2l^{(2-1)}$ 为代表,是研究区页岩

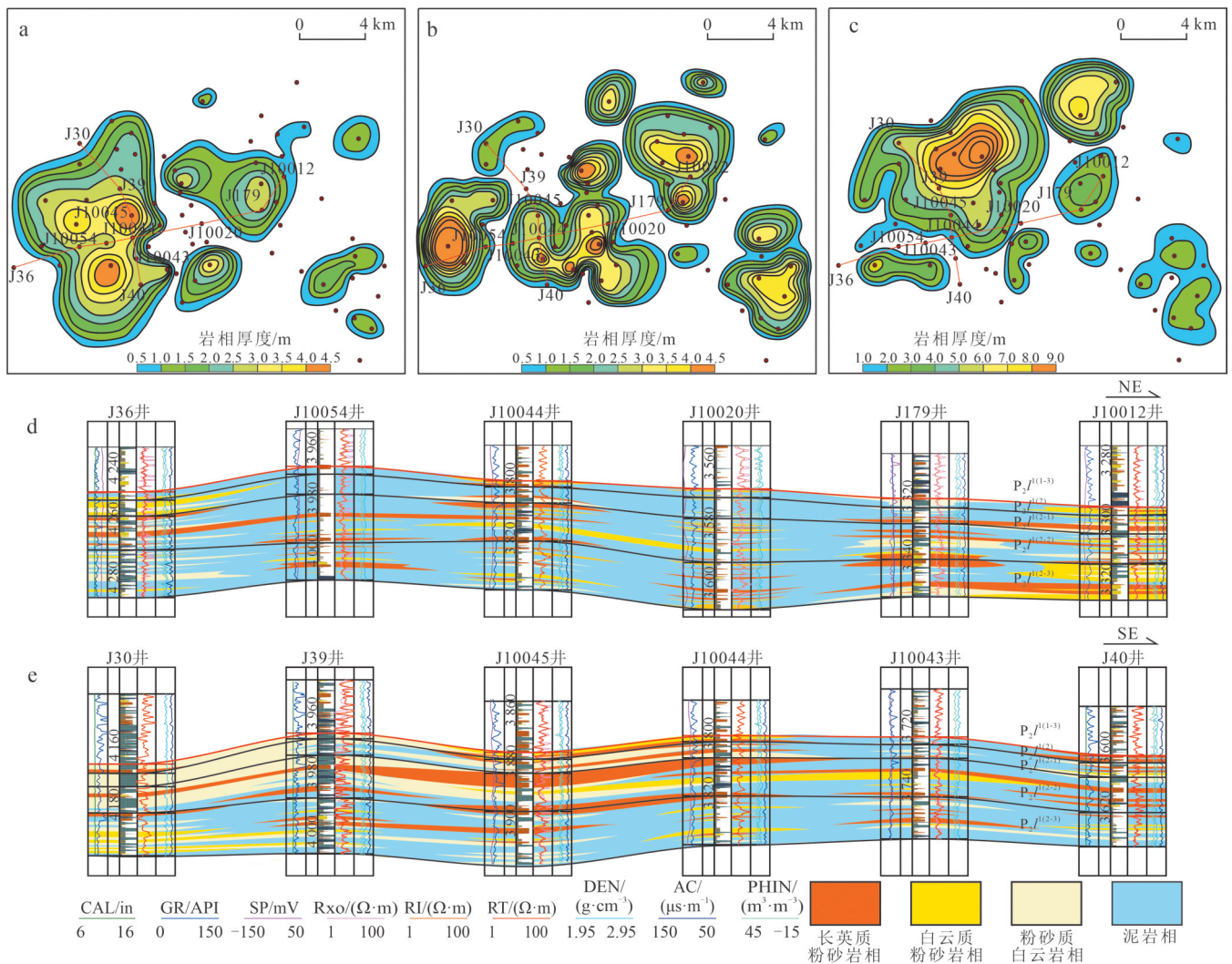


图6 吉木萨尔凹陷 $P_2l^{(2-2)}$ 小层渐变型岩相构型剖面分布特征

Fig. 6 Spatial distribution of gradational lithofacies architecture (thickness contour), Jimsar Sag

a. 长英质粉砂岩岩相厚度等值线; b. 白云质粉砂岩岩相厚度等值线; c. 粉砂质白云岩岩相厚度等值线; d, e. 岩相构型剖面

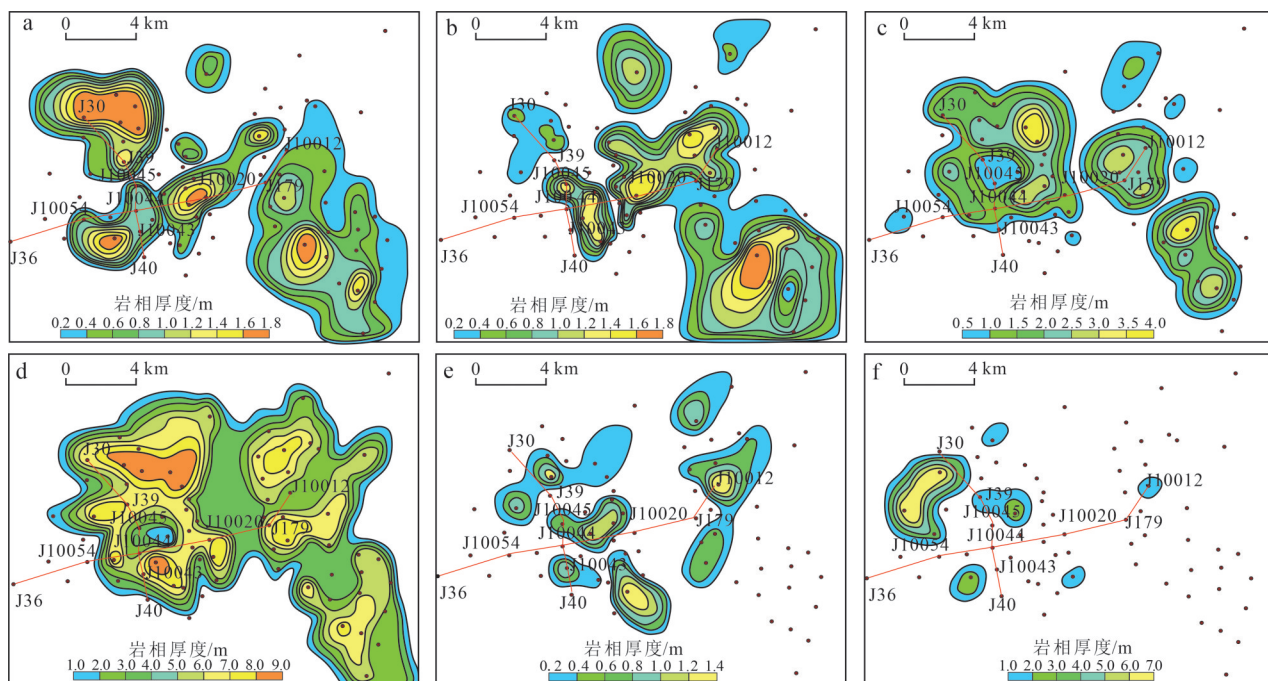


图7 吉木萨尔凹陷突变型与特殊型岩相构型平面分布特征

Fig. 7 Planar distribution of abrupt and special lithofacies architectures, Jimsar Sag

- a. $P_2^{f(2-1)}$ 长英质粉砂岩岩相厚度等值线; b. $P_2^{f(2-1)}$ 白云质粉砂岩岩相厚度等值线; c. $P_2^{f(2-1)}$ 粉砂质白云岩岩相厚度等值线;
d. $P_2^{f(2-2)}$ 长英质粉砂岩岩相厚度等值线; e. $P_2^{f(2-2)}$ 白云质粉砂岩岩相厚度等值线; f. $P_2^{f(2-2)}$ 粉砂质白云岩岩相厚度等值线

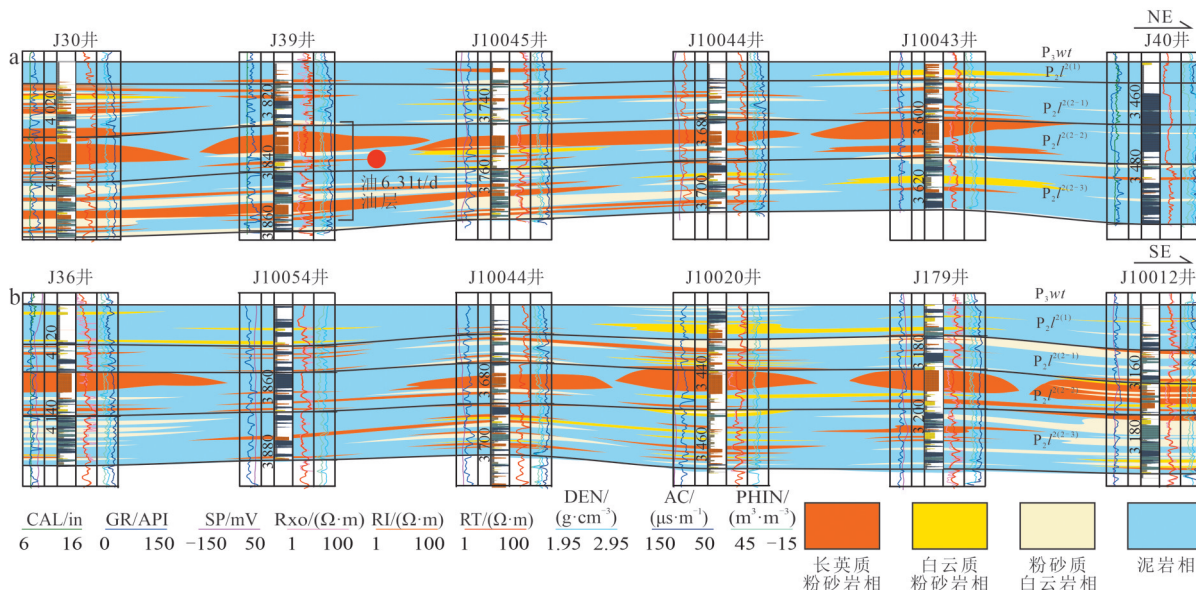


图8 吉木萨尔凹陷芦苇沟组突变型与特殊型岩相构型剖面分布特征(剖面位置见图7)

Fig. 8 Profiles showing the distributions of abrupt and special lithofacies architectures, Jimsar Sag (see Fig. 7 for the locations)

- a. 南北向岩相构型剖面; b. 东西向岩相构型剖面

岩油开发的接替领域,平面上白云质粉砂岩相、粉砂质白云岩相和长英质粉砂岩相的分布位置存在差异,整体厚度薄且相当,分布范围比较大,剖面上砂质粗粒度岩相少有叠置。主要特点是中间粒度粗,上、下呈突变状。长英质粉砂岩相厚度在0.4~1.4 m,平均为0.8 m,主要呈孤立状分布在西北部、中部和东南部(图7a)。白

云质粉砂岩相厚度在0.4~1.2 m,平均为0.6 m,主要呈连片或孤立状分布在中部、东南部(图7b)。砂质白云岩相厚度在1.0~2.5 m,平均为1.5 m,主要呈连片或孤立状分布在中部和西北部(图7c)。剖面上长英质粉砂岩相、白云质粉砂岩相与砂质白云岩相呈薄层孤立状分布(图7)。

特殊型组合以上甜点层 $P_2^{f^{(2-2)}}$ 为代表,是前期研究区页岩油开发的主力目的层,以长英质粉砂岩相为主,厚度较大 5~10 m,平均为 6 m,连片状分布(图 7d)。白云质粉砂岩相厚度在 0.4~1.0 m,平均为 0.5 m,主要呈孤立状分布在中部(图 7e);粉砂质白云岩相厚度在 1.0~3.0 m,平均为 1.5 m,主要呈孤立状分布在西部(图 7f)。白云质粉砂岩相和粉砂质白云岩相发育程度较低。剖面上,主要表现为从薄层泥岩相到长英质粉砂岩相再到薄层泥岩相渐变过度样式,局部可见长英质粉砂岩相与粉砂质白云岩相叠置。剖面上形态呈多个透镜状孤立分布,主要分布在研究区的中部、中东部,而在东部和西部其分布范围局限(图 8)。

4 混积细粒储集岩岩相构型对页岩油甜点的控制作用

4.1 混积细粒储集岩岩相与产能关系

为了得到研究区合理的岩相与产能关系,选取早期压裂和工程条件较为相似的直井,试油试采 26 井/层数据,把岩相厚度与试油结果交会分析,对合采合试层位采用厚度比例劈分后开展分析。其中粉砂质白云

岩相厚度分布比较局限,试油结果显示产能较差,平均 1.15 t/m。长英质粉砂岩相厚度分布范围较广,整体试油效果说明较好,产能平均为 1.73 t/m,但井间差异性较大,体现了此类岩相比较强的非均质性。白云质粉砂岩厚度分布范围最大,试油结果显示产能较好且井间差异小,平均为 2.03 t/m,说明了其非均质性相对较弱的特点。

上述产能高低与孔隙微观结构和烃源岩的总有机碳含量等参数关系密切。前已述及,研究区储集岩岩相以长英质粉砂岩相、白云质粉砂岩相和粉砂质白云岩相为主,泥晶/微晶白云岩和泥岩为非储集岩相。通过岩心薄片和荧光分析发现,长英质粉砂岩相孔隙结构较好,连通性好,主要以粒间孔隙为主,少量发育粒内溶蚀孔隙(图 9a,b),为主要的甜点岩相类型。白云质粉砂岩相孔隙结构极好,溶蚀孔隙发育程度很高,极大改善了孔隙度(图 9c),为重要甜点岩相类型;烃源岩中富含有机质的粉砂质泥岩相荧光显示级别很高(图 9d,g),TOC 较高,平均为 10.85%,是生烃潜力很大的烃源岩。溶蚀孔隙发育的粉砂质白云岩(图 9e,h)孔隙结构较好,TOC 较低(0.85%),为较好甜点储层。荧光扫描显示含油气级别中等的泥晶/微晶白云岩相(图 9f,i),其 TOC 平均为 3.71%,为具有生烃潜力烃源岩相。

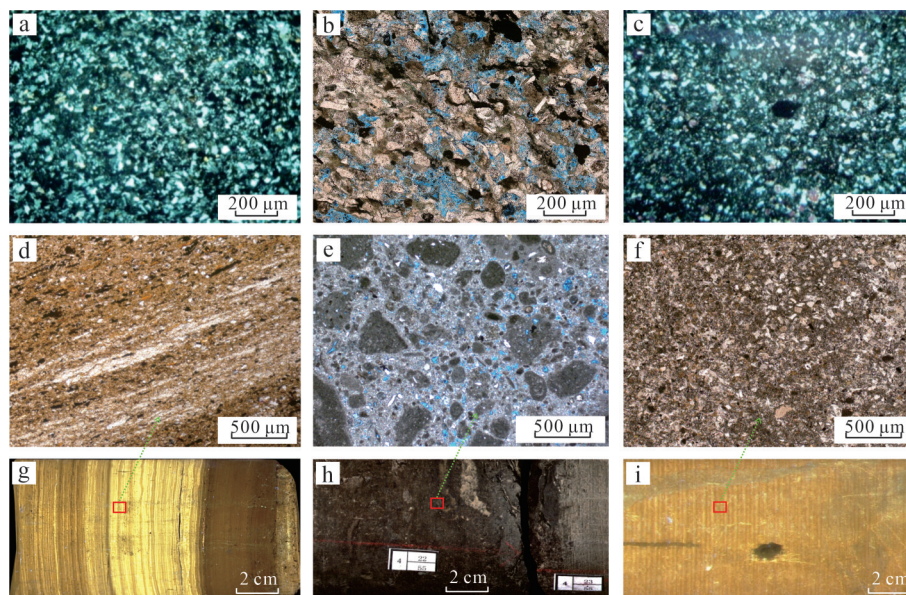


图9 吉木萨尔凹陷不同类型甜点储层微观孔隙特征照片

Fig. 9 Images showing the microscopic characteristics of pores in sweet spots of different types, Jimsar Sag

a. 孔隙结构较好的长石岩屑粉细砂岩,铸体薄片, $P_2^{f^{(2-2)}}$, J174井,埋深 3 127.53 m; b. 孔隙结构较好的石英粉砂岩,铸体薄片, $P_2^{f^{(2-2)}}$, J301井,埋深 2 769.64 m; c. 孔隙结构很好的白云质粉砂岩,铸体薄片, $P_2^{f^{(2-2)}}$, J174井,埋深 3 276.15 m; d. 富含有机质的粉砂质泥岩,普通薄片, $P_2^{f^{(2-1)}}$, J174井,埋深 3 109.22 m; e. 溶蚀孔隙发育的砂屑云岩,铸体薄片, $P_2^{f^{(2-1)}}$, J174井,埋深 3 112.09 m; f. 泥晶/微晶白云岩,普通薄片, $P_2^{f^{(2-3)}}$, J174井,埋深 3 145.19 m; g. 不同含油级别呈纹层状互层(对应 d 图, TOC 为 10.85%),荧光扫描, J174井,第 4 筒 2/55; h. 荧光扫描砂屑白云岩不敏感(对应 e 图, TOC 为 0.85%),荧光扫描, J174井,第 4 筒 22/55; i. 含油气级别中等(对应 f 图, TOC 为 3.71%), J174井,第 8 筒 2~4/45

4.2 混积细粒储集岩岩相对甜点的控制作用

2017年以来,吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油现场生产实践表明,地质因素是影响页岩油产能的主要因素。不同储集岩岩相构型导致了油气成藏特征和生产动态上明显的差异性。储集岩岩相构型控制了甜点分布,并影响总体开发部署与策略。

从研究区各类岩相平面叠合分布图可以看出, $P_2l^{(2-2)}$ 的渐变型岩相构型甜点主要分布在岩相组合复杂叠置位置,为混合浅湖相带的混合滩坝与云坪微相的叠置部位,核磁饱和度值整体偏高,局部高值区明显;西部呈分散连片分布,东部呈非均质性较弱的连续分布。试油结果显示,其为页岩油储层开发效果最好的层段(图10a)。生产结果显示,此类岩相构型的水平井压裂效果较好,除白云质粉砂岩脆性较好外,其源-储配置较好,储集层储油丰度较高,压力系数大,且较为均质。因此,叠置区是目前水平井部署的有利区域(图10d)。

$P_2l^{(2-1)}$ 甜点层主要为突变型岩相构型,呈孤立状分布,西部、东部和东南部分散,整体核磁含油饱和度值不高,非均质性相对弱,其孔隙结构较复杂,大部分

难达到经济有效储层下限标准(图10b)。试油结果显示,其水平井压裂效果一般。粉砂质白云岩脆性虽然较好,但储层物性较差。突变型岩相构型的源-储配置一般,储集层储量丰度不高,压力系数较小。因此,此甜点层是水平井开发的后续接替目的层(图10e)。

$P_2l^{(2-2)}$ 甜点层主要为特殊型岩相构型,呈厚层大面积孤立状分布,核磁含油饱和度整体值虽然较高,但甜点分布形态为土豆状,局限连通且构型边界明显,整体呈分散状,连续性较差,表现出了较强的非均质性(图10c)。试油结果显示,其为页岩油开发效果较好的层段。生产结果显示,此甜点层水平井压裂效果较好,是研究区早期开发的主力层,其脆性虽然不如白云岩含量高的岩性,但储层物性较好,特殊型厚层碎屑岩岩相构型的源-储配置较好,储集层储量丰度较高,压力系数一般。长英质粉砂岩厚度和储量均较大,但受岩相构型分布和微观孔隙结构十分复杂的影响,不同区域产能差异悬殊。因此,在目前经济技术条件下,水平井部署需要对岩相构型的分布特征进行精细刻画,主要考虑在核磁含油饱和度较高的部位部署水平井(图10f)。

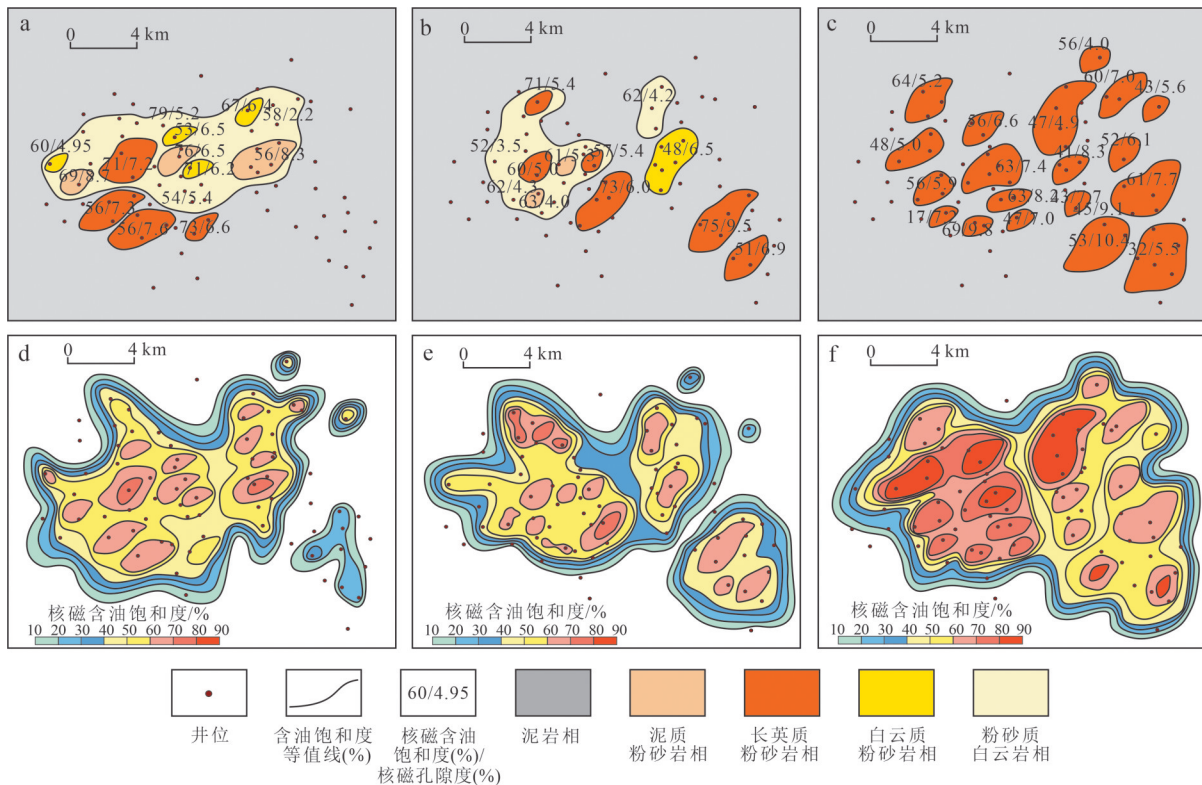


图10 吉木萨尔凹陷甜点岩相与核磁含油饱和度平面分布

Fig. 10 Planar distribution of sweet-spot lithofacies and nuclear magnetic oil saturation, Jimarsar Sag

a. $P_2l^{(2-2)}$ 甜点岩相; b. $P_2l^{(2-1)}$ 甜点岩相; c. $P_2l^{(2-2)}$ 甜点岩相; d. $P_2l^{(2-2)}$ 核磁含油饱和度等值线;

e. $P_2l^{(2-1)}$ 核磁含油饱和度等值线; f. $P_2l^{(2-2)}$ 核磁含油饱和度等值线

5 结论

1) 把无人机倾斜摄影技术与传统人工野外露头考察结合起来,对露头剖面芦草沟组岩相构型模型进行了表征。从井点设置、岩相类型定量刻画、格架模型和三维岩相原型建立等方面,表征了岩相构型三维空间分布特征,其岩相分布整体较为稳定,局部存在岩相构型变化。

2) 混积细粒储集岩岩相构型组合主要有渐变型、突变型和特殊型3类。渐变型砂体发育程度较高,形成上下对称状岩相构型,存在溶蚀孔隙发育的优质储层,呈多个相似旋回的叠置。突变型砂体发育程度一般,形成非对称状岩相构型,储集层厚度薄,品质一般,呈多个相似旋回的叠置。特殊型属于混积岩中相对独立的厚层碎屑岩类型,砂体发育程度较高,为厚层块状长石岩屑砂岩相,属于相对优质储层,呈单一旋回叠置。

3) 岩相构型控制了甜点分布,不同的岩相构型组合需采用不同的开发部署策略。渐变型甜点含油饱和度值高,非均质性弱,为页岩油开发效果最好层段,宜采取大规模平台化水平井开发。突变型岩相构型甜点含油饱和度值低,非均质性较强,为开发效果一般层段,是后续接替区域。特殊型岩相构型的含油饱和度值虽高,但平面呈分散状,非均质性较强,为页岩油储层开发效果较好的层段。水平井的部署,需对岩相构型开展精细刻画后,方可有针对性开展。

参 考 文 献

- [1] 印森林,陈恭洋,张玲,等. 岩相构型对致密砂岩优质储层的控制作用——以川西坳陷须二段为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1179-1189.
Yin Senlin, Chen Gongyang, Zhang Ling, et al. The controlling effect of lithofacies architecture on high quality tight sandstone reservoirs: A case study of second member of the Upper Triassic of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1179-1189.
- [2] 杜金虎,胡素云,庞正炼,等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.
Du Jinhua, Hu Suyun, Pang Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
- [3] 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.
- [4] 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, 2021, 48(1): 1-12.
- [5] 于兴河,李顺利,杨志浩. 致密砂岩气储层的沉积-成岩成因机理探讨与热点问题[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(1): 1-14.
Yu Xinghe, Li Shunli, Yang Zhihao. Discussion on deposition-diagenesis genetic mechanism and hot issues of tight sandstone gas reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(1): 1-13+131.
- [6] 袁选俊,林森虎,刘群,等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43.
Yuan Xuanjun, Lin Senhu, Liu Qun, et al. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 34-43.
- [7] 陈世悦,张顺,刘惠民,等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 271-284.
Chen Shiyue, Zhang Shun, Liu Huimin, et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 271-284.
- [8] 姜在兴,孔祥鑫,杨叶芃,等. 陆相碳酸盐细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1-12.
Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Yang Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-12.
- [9] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [10] 滕建彬,刘惠民,邱隆伟,等. 东营凹陷古近系湖相细粒混积岩沉积成岩特征[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3807-3826.
Teng Jianbin, Liu Huimin, Qiu Longwei, et al. Sedimentary and diagenetic characteristics of lacustrine fine-grained hybrid rock in Paleogene Formation in Dongying Sag [J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3807-3826.
- [11] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional Petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.
- [12] 董春梅,马存飞,林承焰,等. 一种泥页岩层系岩相划分方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 1-7.
Dong Chunmei, Ma Cunfei, Lin Chengyan, et al. A method of classification of shale set [J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(3): 1-7.
- [13] Bowker K A. Barnett shale gas production: Fort Worth Basin—Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.

- [14] Bohacs K M. Introduction: Mud rock sedimentology and stratigraphy—Challenges at the basin to local scales [M]// Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. Shales and mudstones: Basin studies, Sedimentology and paleontology: Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998, 1: 13–20.
- [15] Henry G, Daniela B, Roger S. Lithofacies and stratigraphy of a complete Woodford shale outcrop section in South Central Oklahoma: Geologic considerations for the evaluation of unconventional shale reservoirs [J]. Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, 2017, 6(1):15–27.
- [16] 惠克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长₇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 ₇ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244–1255.
- [17] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5):598–607.
- Liu Bo, Lü Yantang, Meng Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 598–607.
- [18] 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.
- [19] 胡宗全, 郑伦举, 申宝剑, 等. 非常规与常规统一的含油气系统之初探[J]. 地质论评, 2021, 67(4):1007–1020.
- Hu Zongquan, Zheng Lunju, Shen Baojian, et al. Preliminary study on unconventional and conventional oil-bearing gas systems [J]. Geological Review, 2021, 67(4):1007–1020.
- [20] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819–828.
- Hu Suyun, Zhao Wenzhi, Hou Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 1–10.
- [21] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5):322–331.
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322–331.
- [22] 卢双舫, 李俊乾, 张鹏飞, 等. 页岩油储集层微观孔喉分类与分级评价[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 1–9.
- Lu Shuangfang, Li Junqian, Zhang Pengfei, et al. Classification of microscopic pore-throats and the grading evaluation on shale oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 436–444.
- [23] 金旭, 李国欣, 孟思炜, 等. 陆相页岩油可动性微观综合评价研究[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1):1–11.
- Jin Xu, Li Guoxin, Meng Siwei, et al. Microscale comprehensive evaluation of continental shale oil recoverability [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1–11.
- [24] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6):1067–1078.
- Jiao Fangzheng, Zou Caineng, Yang Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6):1067–1078.
- [25] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1):13–26.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(01):13–26.
- [26] 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.
- [27] 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1168–1184.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6):1168–1184.
- [28] 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.
- [29] 宋岩, 罗群, 姜振学, 等. 中国中西部致密油富集机理及其主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2):1–13.
- Song Yan, Luo Qun, Jiang Zhenxue, et al. The enrichment of tight oil and its controlling factors in central and western China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 1–13.
- [30] 杜学斌, 刘晓峰, 陆永潮, 等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式——以东营凹陷为例[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1324–1333.
- Du Xuebin, Liu Xiaofeng, Lu Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: a case study of Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11):1324–1333.
- [31] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 198–209.
- Zhang Shaomin, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin [J].

- Frontiers of Earth Science, 2018, 25(4): 198–209.
- [32] 惠克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1495–1507.
- Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation Jimsar sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1495–1507.
- [33] 刘占国, 张永庶, 宋光永, 等. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1–13.
- Liu Zhanguo, Zhang Yongshu, Song Guangyong, et al. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 68–80.
- [34] 宋岩, 高凤琳, 唐相路, 等. 海相与陆相页岩储层孔隙结构差异的影响因素[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1501–1512.
- Song Yan, Gao Fenglin, Tang Xianglu, et al. Influencing factors of pore structure differences between marine and terrestrial shale reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1501–1512.
- [35] Mount J F. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification [J]. Sedimentology, 1985, 32(3): 435–442.
- [36] 曲长胜. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组富有机质混积岩特征及其形成环境[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- Qu Changsheng. Characteristics and depositional environment of organic-rich mixed sedimentary rocks in Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2017.
- [37] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657–667.
- Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657–667.
- [38] 马克, 侯加根, 刘钰铭, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组咸化湖混合沉积模式[J]. 石油学报, 2017, 38(6): 636–648.
- Ma Ke, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. The sedimentary model of saline lacustrine mixed sedimentation in Permian Lucaogou Formation Jimsar sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(6): 636–648.
- [39] 李书琴, 印森林, 高阳, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 235–249.
- Li Shuqin, Yin Senlin, Gao Yang, et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimusaer Sag, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 235–249.
- [40] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524–534.
- Zhi Dongming, Tang Yong, Yang Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524–534.
- [41] 季岭, 刘钰铭, 郭小龙, 等. 枣园油田孔缝型油藏单井产能地质控制因素研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(4): 566–575.
- Ji Ling, Liu Yuming, Guo Xiaolong, et al. Geological controlling factors of single well productivity in perforated and fractured reservoir in Zaoyuan oilfield [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(4): 566–575.
- [42] 王越, 张关龙, 王圣柱, 等. 博格达山东北缘上二叠统沉积特征与沉积演化模式[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 579–588.
- Wang Yue, Zhang Guanlong, Wang Shengzhu, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of the Upper Permian on the northeast periphery of Bogda Mountain [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 579–588.
- [43] Yin S, Zhu B, Wu Y, et al. Lithofacies architecture and distribution patterns of lacustrine mixed fine-grained rocks — A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, NW China [J]. Frontiers of Earth Science, 2021, 9: 782208.
- [44] 魏丽. 沉积岩岩性的遥感解译及应用——以新疆吉木萨尔地区为例[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- Wei Li. Remote sensing interpretation and application of sedimentary lithology — A case study in Jimsar district of Xinjiang [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [45] 徐希旺. 准东南地区平地泉组沉积相及储层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- Xu Xiwang. Study on the sedimentary facies and reservoir characteristics of Pingdiquan Formation in Southeast area of Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2017.
- [46] 印森林, 高阳, 胡张明, 等. 基于无人机倾斜摄影的露头多点地质统计模拟——以山西吕梁坪头乡石盒子组为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 198–216.
- Yin senlin, Gao Yang, Hu Zhangming, et al. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: A case study of Shihezi Formation in Pingtou township, Lvliang city, Shanxi [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 198–216.
- [47] 印森林, 陈恭洋, 刘兆良, 等. 基于无人机倾斜摄影的三维数字露头表征技术[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 72–80.
- Yin Senlin, Chen Gongyang, Liu Zhaoliang, et al. 3D digital outcrop characterization technology based on Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photography [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 72–80.
- [48] Yin S, Feng K, Nie X, et al. Characterization of marine shale in Western Hubei Province based on unmanned aerial vehicle oblique photographic data [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2022, 6(3): 252–263.