

复杂断块扇三角洲地震沉积学表征

——以辽河油田 HH19 断块沙二段油藏为例

张朝辉¹, 闵忠顺², 刘洁², 李滨², 郭泽萍², 谢俊¹, 王金凯¹, 张文轩¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124000)

摘要:辽河坳陷兴隆台背斜南部沙二段油藏断裂发育, 构造复杂, 井网控制程度差异大, 常规研究技术在储层精细表征方面效果不佳, 制约了油藏采收率的提高。本研究以区内 HH19 油藏为例, 开展了基于地震多属性融合技术的复杂断块沉积微相表征研究, 实现了储层砂体的精细刻画及其展布规律的高精度预测。首先, 结合岩心观察、单井相表征及测井相结果, 认为研究区发育扇三角洲沉积相, 并划分 4 种沉积微相类型; 然后, 基于 90°相位转换、分频处理、地层切片对比等技术, 明确了不同沉积微相的地震属性响应特征, 借助属性聚类分析方法, 提取多种能够反映扇三角洲沉积规律的地震相属性, 并进行融合分析, 精确刻画沙二段的沉积微相展布规律; 最后, 综合沉积相及地震相研究成果, 预测沙二段储层砂体的空间展布规律, 为同类型复杂断块油藏的精细地质研究提供依据。

关键词:地震沉积学; 沙二段; 多属性融合; 聚类分析; 扇三角洲

中图分类号:TE122

文献标志码:A

Characterization of seismic and sedimentary facies in complex fault block fan delta:

A case study of Es₂ oil reservoir in HH19 fault block of Liaohe Oilfield

ZHANG Zhaohui¹, MIN Zhongshun², LIU Jie², LI Bin², GUO Zeping²,

XIE Jun¹, WANG Jinkai¹, ZHANG Wenxuan¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield, CNPC, Panjin 124000, China)

Abstract: The second member of Shahejie Formation (Es₂) oil reservoir in the southern Xinglongtai Anticline of Liaohe Depression is characterized by well-developed faults, complex geological structures and great differences in well network control. However, the conventional technical methods have proven inadequate in refined reservoir characterization, which constrains the improvement of oil recovery efficiency. Taking the HH19 oil reservoir in the region as an example, this paper conducted a study on the characterization of complex fault block sedimentary microfacies based on seismic multi-attribute fusion technology and achieved the high-precision predictions of the fine characterization and distribution law of reservoir sand bodies. Firstly, based on core observation, single well facies characterization, and logging facies results, the well-developed fan delta sedimentary facies in the study area was determined and four types of sedimentary microfacies were classified. Then, by using the techniques of 90 degree phase conversion, frequency division processing, and stratigraphic slice comparison, the seismic attribute response characteristics of different sedimentary microfacies were clarified. By using the method of attribute cluster analysis,

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD033)

作者简介: 张朝辉(1996—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事油气田开发地质研究。

王金凯(1982—), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事油气田开发、地下储气库运行数值模拟研究, 本文通信作者。E-mail: wangjk@sdust.edu.cn

the multiple seismic facies attributes that could reflect the sedimentary laws of the fan delta were extracted and fused for analysis to accurately characterize the distribution pattern of sedimentary microfacies in the Es_2 . Finally, based on the research results of sedimentary facies and seismic facies, the spatial distribution pattern of sand bodies in the Es_2 reservoir was predicted, providing a basis for the fine geological study of complex fault block oil reservoir of the same type.

Key words: seismic sedimentology; the second member of Shahejie Formation (Es_2); multi-attribute fusion; cluster analysis; fan delta

地震沉积学是在地震地层学和层序地层学基础上发展起来的地质学与地球物理学交叉学科^[1]。地震沉积学综合利用纵向地震剖面信息及水平方向地震属性切片信息,全面刻画地层或地质体的岩性、沉积及物性特征,成为油气储层精细刻画及定量描述的主要手段^[2]。黄凯等^[3]利用古地貌、岩心相、测井相、地震相及振幅属性切片分析,明确了东营组各层序格架沉积相类型、展布及沉积演化规律,为该区油气深层次勘探开发提供了地质依据。耿晓洁等^[4]利用地震沉积学研究了泌阳凹陷东南部核桃园组沉积规律,阐述了近岸水下扇复合沉积体系的砂体展布特征,并结合钻井资料建立了核三上亚段的沉积相模式。刘军等^[5]利用地震沉积学 90° 相位转换技术解决同相轴与岩性的对应关系,并利用 Wheeler 域转换技术解决同相轴的穿时问题,结合地层等时切片技术刻画薄层砂岩尖灭线,对岩性油气藏勘探具有重要意义。近年来,随着机器学习技术、3D 地震采集与处理技术以及体积属性技术的不断进步,地震沉积学在识别沉积体的平面展布特征方面更加精确和高效^[6],尤其是针对复杂破碎断块的构造破碎、岩性变化大、隐蔽性强及油藏面积小等特点,该项技术可以准确揭示断块间的沉积关系和储层特征,大幅提高该类油气藏的储层刻画程度。

辽河拗陷兴隆台油层的 HH19 块经过多年开发,已进入开发中后期,面临诸多技术难题,如低序级断层解释刻画困难、砂体展布规律预测难度大及剩余流体表征程度低等,严重制约了油藏挖潜措施的制定及采收率的提高。本研究基于钻井、测井资料和三维地震数据,开展构造精细解释及地震沉积学研究,利用属性聚类分析消除低序级断块的影响,解决受复杂断裂系统影响的平面地震属性表征等技术难题,精确刻画了沙二段沉积微相和砂体展布规律。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北部,是古近纪形成的大陆裂谷背景下的断陷-拗陷型盆地^[7],可划分为 6 个次级构造单元:西部凸起、西部凹陷、中央凸起、大民屯凹陷、东部凹陷和东部凸起(图 1(a))。其中,西部凹陷面积约 $2\,530\text{ km}^2$,是辽河拗陷面积最大、油气资源最为富集的二级构造单元。古近系沙河街组是西部凹陷的重要油气储层,沉积厚度大,发育扇三角洲沉积相,物源来自北和北东方向,沙河街组二段(the second member of Shahejie Formation, Es_2)为主力含油气层位^[8-9]。兴隆台油田 HH19 块位于辽河拗陷西部凹陷兴隆台背斜构造带南部,面积约 40 km^2 ,发育 13 条断层,走向为近东西向、北东向和北西向(图 1(b))。

1.2 地层发育特征

辽河拗陷西部凹陷古近系自下而上为房身泡组、沙河街组(包括沙河街组四段、三段、二段、一段)、东营组(包括东营组三段、二段、一段),主力含油气层位为沙河街组二段,岩性为浅灰色、灰黄色、灰色块状砂砾岩、含砾砂岩、细砂岩夹灰绿色及灰色粉砂岩、泥岩、粉砂质泥岩,顶部为褐灰色钙质页岩,下部为深灰色泥岩夹薄层粉砂质泥岩。为探讨区内钻井地层、岩性、电性与地震反射的关系,制作 100 口井的地震合成记录,并进行时间和深度转换关系拟合和地层划分对比。其中,泥岩的测井曲线呈自然电位(spontaneous potential, SP)、自然伽马(gammaray, GR)和声波时差(acoustic interval transit time, AC)高值,砂岩则表现为 SP、GR 和 AC 均为低值,波阻抗(acoustic impedance, AI)高值。利用不同的测井曲线组合可以识别地层界面,依据岩性、电性特征将 HH19 块沙二段划分为 VI~Ⅷ共 7 个砂组^[10](图 2)。

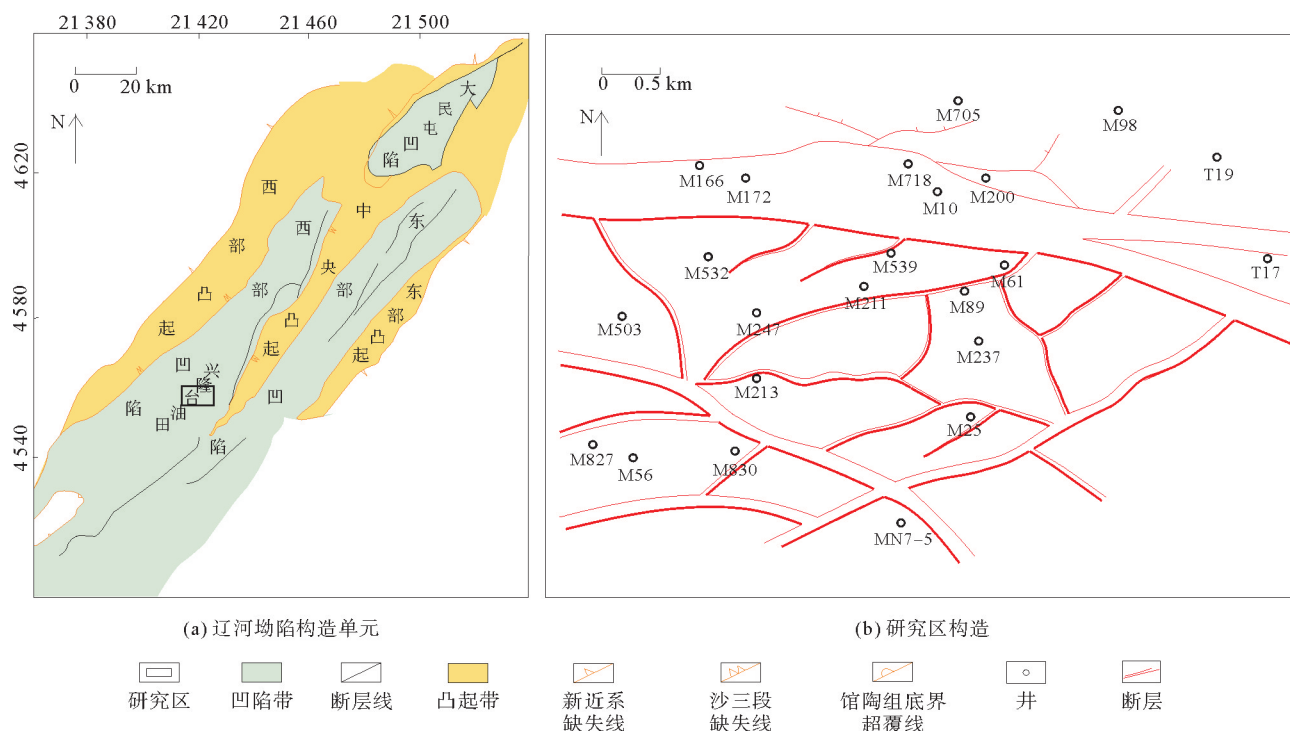


图1 辽河拗陷构造位置

Fig. 1 Structural location of Liaohe Depression

2 沉积相分析

泥岩颜色可指示其形成的沉积环境,HH19块泥岩呈深灰色、灰色、灰绿色和灰褐色,其中底部泥岩为褐灰色、灰褐色、深灰色和灰色,向上递变为深灰色和灰色,且泥岩中含大量黄铁矿自生矿物,表明形成于半还原-还原沉积环境(图3)。

兴隆台油田沙河街组二段主要发育扇三角洲前缘亚相,包括水下分流河道、河口坝、河道间和席状砂4个微相^[11](图4):①水下分流河道微相,是本区的主要相带类型,多为厚层砂砾岩和含砾砂岩,板状、槽状交错层理、斜层理,河道呈条带状向东北向延伸,河道宽度200~500 m,分布范围较大,SP曲线呈箱形,钟形;②河口坝微相,岩性为砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩夹薄层泥质粉砂岩和灰绿色泥岩组合,且核部较侧翼及端部厚度大,SP曲线呈漏斗形-箱形,地层真电阻率(true formation resistivity, RT)曲线为箱型;③河道间微相,岩性为粉细砂岩、少量含砾砂岩夹绿灰色、灰色泥岩和褐灰色的钙质页岩,水平层理,SP曲线呈低幅平直形,RT曲线为齿状;④席状砂微相,形成于湖流和波浪作用,岩性较细,主要为细砂岩、粉细砂岩、泥质粉砂岩,以粉细砂岩为主,分选较好,砂体面积较小,SP曲线呈齿状或指状,RT曲线呈漏斗形。

3 地震沉积学分析

3.1 岩性标定

在地震沉积学研究中,90°相位转换技术被广泛应用,其原理是将地震资料进行90°相位转换,使地震同相轴对应地层,使其具有一定的岩性地层意义。原始地震数据剖面中砂岩和泥岩的地震反射特征并不对称,地震同相轴与测井曲线中的岩性也不具有对应关系,由图5(a)可以看出,沙二段标志层为中弱振幅反射且有同相轴分叉现象,进行90°相位旋转后,地震反射波同相轴的波峰(谷)对应地层。如图5所示,砂体对应红色同相轴(波峰),泥岩对应蓝色同相轴(波谷)。地震同相轴与自然伽马测井曲线的薄层砂体基本对应,利于薄层砂体的识别^[12](图5(b))。

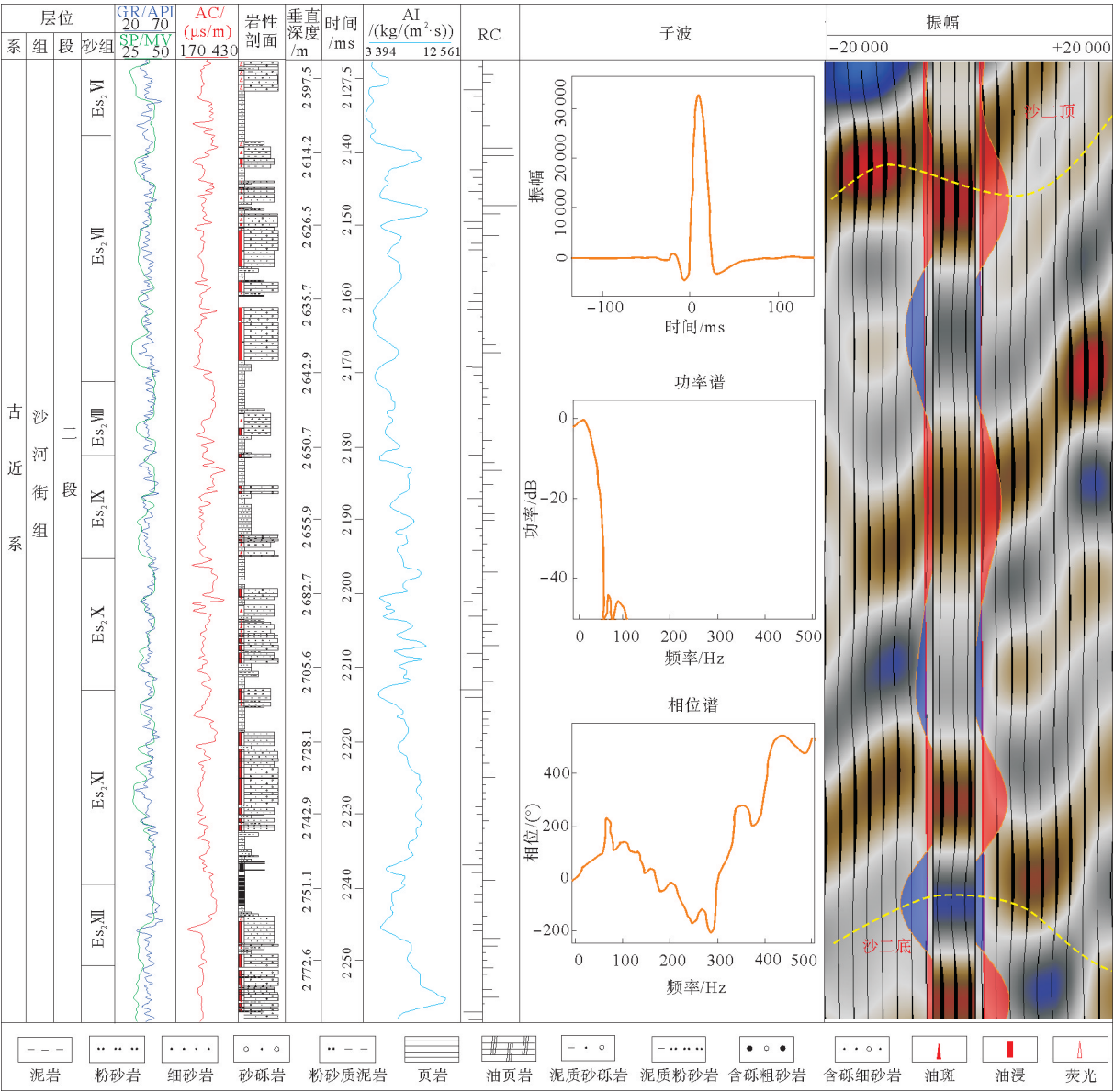
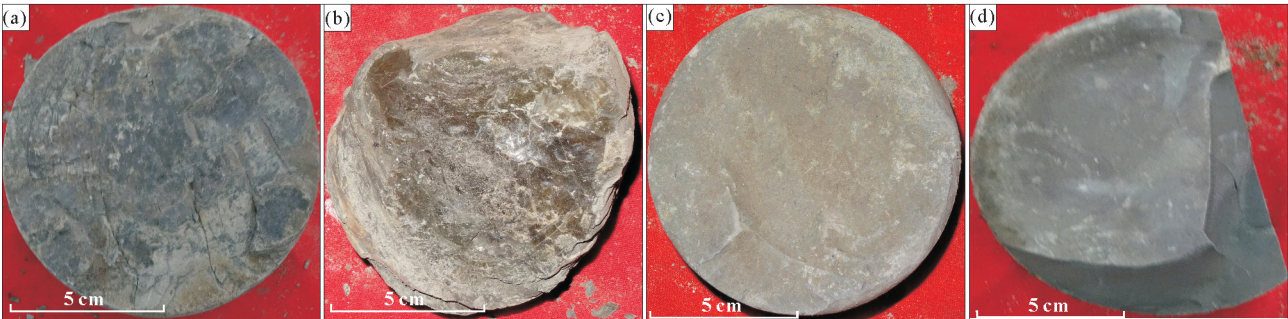


图 2 兴隆台油田 HH19 块地层发育特征及合成地震记录

Fig. 2 Characteristics of stratigraphic development and synthetic seismic records of the HH19 in Xinglongtai Oilfield



(a) M208,2 832.3 m,黑色泥岩;(b) M238,2 680 m,灰色泥岩;(c) M41,2 696.8 m,灰绿色泥岩;(d) M20-18-18,2 268.1 m,深灰色泥岩

图 3 研究区沙二段泥岩颜色特征

Fig. 3 Color characteristic of mudstone in the Es₂ of the study area

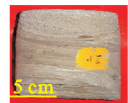
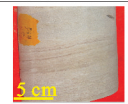
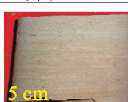
亚相	微相	岩石类型	颜色	层理特征		电性特征	
扇三角洲前缘	水下分流河道	砂砾岩 含砾砂岩	灰色 灰绿色	板状槽状 交错层理 平行层理	 交错层理 M41井, 2 661.5 m	SP RT	
	河口坝	砂砾岩 含砾砂岩 粗砂岩夹薄层泥质粉砂岩和泥岩	灰色 灰绿色	平行层理 斜层理	 斜层理 M16井, 2 757.6 m	SP RT	
	席状砂	细砂岩 粉细砂岩 泥质粉砂岩	灰色 灰绿色	波状层理 水平层理	 水平层理 M225井, 2 679.1 m	SP RT	
	河道间	粉细砂岩 少量含砾砂岩、泥岩	灰色 灰绿色 褐灰色	波状层理 水平层理	 水平层理 M41井, 2 694.7 m	SP RT	

图 4 兴隆台油田 HH19 块扇三角洲前缘亚相的沉积微相特征

Fig. 4 Sedimentary microfacies characteristics of the fan delta front subfacies of the HH19 in Xinglongtai oilfield

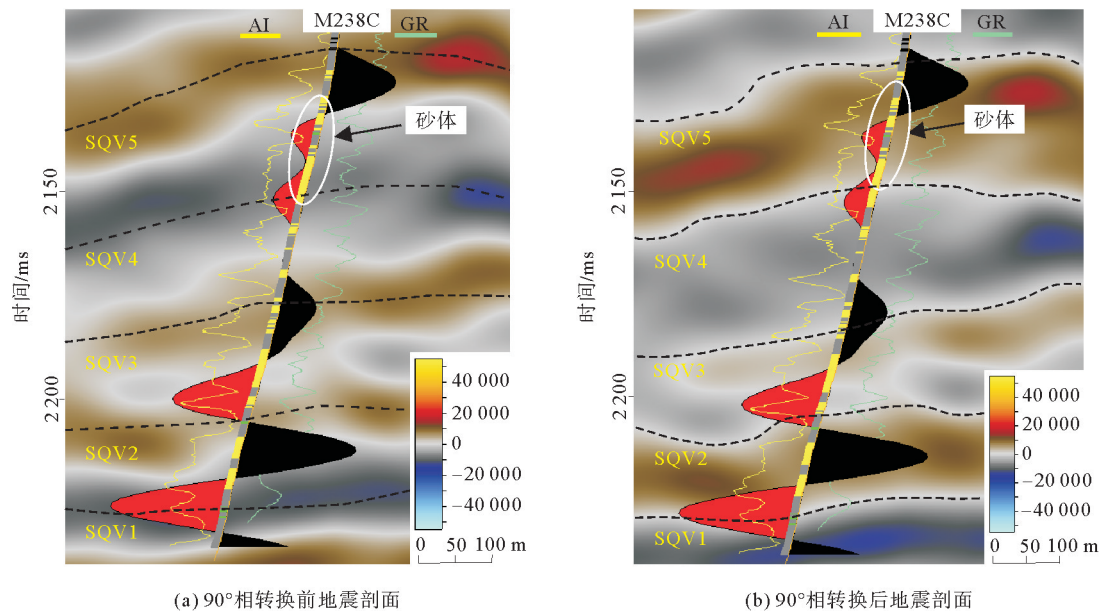


图 5 HH19 区块 Es₂ 90°相转换前后的地震属性比较

Fig. 5 Comparison of seismic attributes before and after 90 degree phase conversion of the Es₂ in HH19

在地震沉积学中,对波阻抗和自然伽马曲线进行交汇分析可提高砂岩和泥岩的识别精度,揭示沉积相和沉积环境的变化。本研究通过地震剖面 90°相位转换,建立自然伽马-波阻抗交会图,分析岩性和波阻抗之间关系,利用振幅属性预测岩性。研究区目的层段发育砂砾岩、细砂岩、泥质粉砂岩和泥岩,不同岩性的波阻抗值不同,砂岩为高波阻抗,泥岩为低波阻抗,砂泥岩分界处波阻抗值为 $7\times10^3\sim9\times10^3\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (图 6)。

90°相位转换使岩性界面对应波阻抗界面,以更准确地识别地层特征,而分频处理则可突出不同尺度的地质结构,发挥地震数据中高频和低频成分的优势,提高地震资料的分辨率和数据体的成像效果,检测地质体横向不连续性及其内部细微结构。混合相位子波拓频是一种地震子波提取技术,可从地震信号中提取具有真实相位特性的地震子波。本研究基于此技术,得到原始数据体的频宽为 10~55 Hz,其中 40 Hz 为优势频率,同相轴的响应最强。对比分频处理前后地震剖面可以发现,分频前地震剖面中薄层砂体的地震反射特征不明显,难以识别(图 7(a));而分频后地震剖面中的薄层砂体地震反射特征较明显,且砂体分布特征与连井剖面吻合,能有效刻画薄层砂体(图 7(b))。因此,地震分频技术可较好地识别与预测砂体。

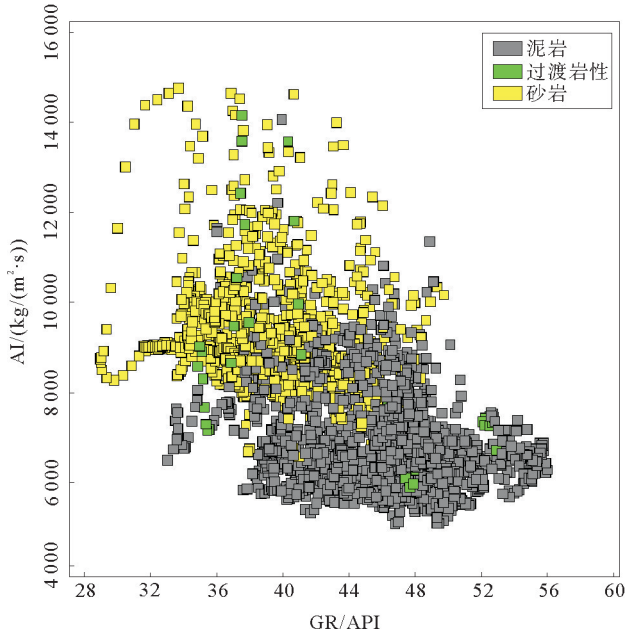


图 6 研究区沙二段砂泥交互图

Fig. 6 Interaction diagram of sand and mud in the Es₂ of the study area

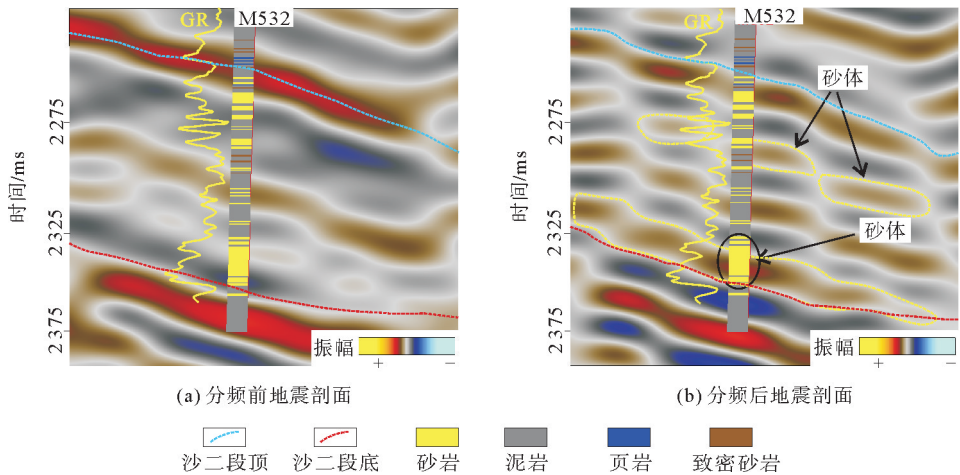


图 7 地震分频处理

Fig. 7 Seismic frequency division processing

3.2 地层切片技术

地层切片技术通过两个等时界面之间等比例内插切片实现^[13]。本研究以时间域为单位,每隔 20 ms 沿地震同相轴、垂直于时间轴方向切片,读取主体砂体的切片特征,观察对应时间界面的地震响应特征。对地震资料进行地层切片时,常选择沉积相变化最明显的属性进行提取和分析,利于分析砂体的分布、厚度及空间展布特征。但地层切片穿越复杂沉积体时,可能会因技术因素(分辨率、切片相位、时窗大小和时窗位置)截取到同一砂体的不同部位,因此单一地层切片很难精细刻画沉积微相的展布,需要结合多种信息进行准确解读。

通过地层切片技术、90°相位转换和分频处理后,可清晰地识别地层沉积旋回、岩性变化以及沉积体系特

征,对探讨沉积盆地演化历史和油气藏的分布具有重要意义。由图 8(a)可以看出,研究区沙二段Ⅷ砂组以水下分流河道微相为主,呈南西—北东向展布,强振幅(绿色-黄色-红色)代表砂体,西北部 and 南部为连片的黄色-红色的强振幅反射,而蓝色弱振幅较少。由图 8(b)可以看出,沙二段Ⅺ砂组为连续大面积绿色到浅蓝色的弱振幅,发育河道间微相,北部见部分砂体,其中河道间泥岩中夹杂漫溢成因的孤立砂体^[14]。

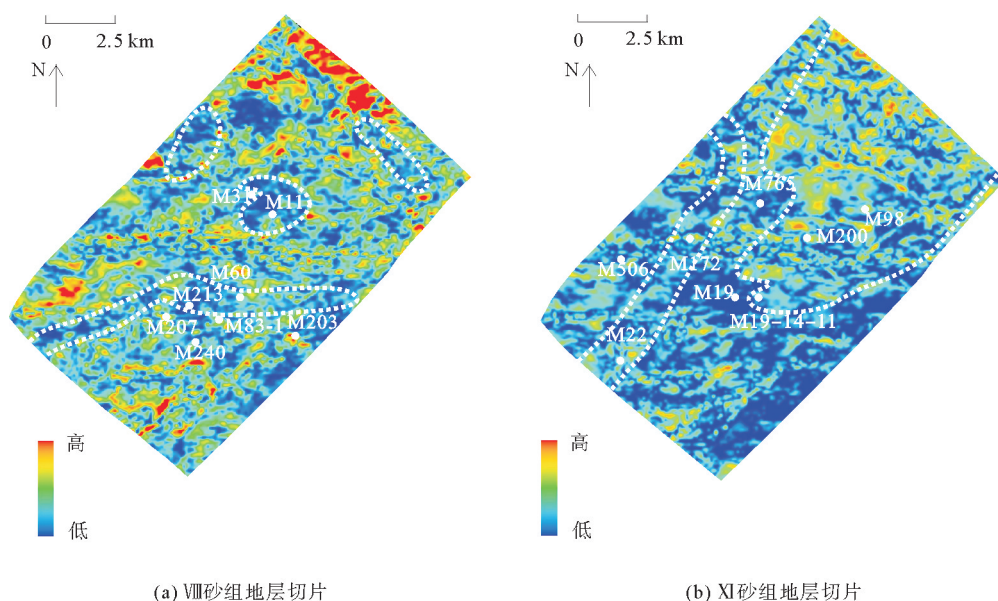


图 8 研究区沙二段地层切片

Fig. 8 Stratigraphic slicing in the Es_2 of the study area

4 属性聚类分析

本研究提取 HH19 块沙二段Ⅷ砂组 3 种层间地震属性,主要包括均方根振幅、总振幅和能量半衰时属性,其中总振幅和能量半衰时属性可反映河道的展布样式和方向(图 9)。由图 9(a)可以看出,均方根振幅属性显示具有河道特征的强反射砂岩(绿色-黄色-红色)呈条带分布,暗色泥岩较多,分布于河道之间;由图 9(b)可以看出,总振幅属性显示大面积的高亮部分为连续性较好的河道砂岩,呈北东—南西方向展布,可以明显看出物源来自北东方向,暗色泥岩较少,零星分布于中部和南部;由图 9(c)可以看出,能量半衰时属性显示具有河道特征的强反射砂岩主要分布于研究区中部,河道间向南部能量衰减较快。

地震属性聚类监督因子融合了地震属性分析和监督学习两种方法,通过融合多种地震属性来提高地震资料解释的准确性和效率,其核心在于利用已知的地质信息(监督信息)进行属性的聚类分析,以更准确地识别和预测地质结构和油气藏。由图 9 可以看出,三种单一属性反映的信息存在显著差异,因此本研究采用属性聚类方法将三种地震属性融合为一个新的属性,利用测井曲线和岩心数据建立监督因子,并辅以神经网络人工技术对层间地震属性进行模糊聚类和预测估算(图 10(a))。融合后的结果不仅包括均方根振幅属性显示的砂岩和沉积相展布特征,还在沉积相带变化边缘处,融合属性得到加强。因此,本研究通过监督因子融合,清晰显示了Ⅷ砂组的沉积微相分布(图 10(b)),水下分流河道从北东向南西向展布,其间分布少量的席状砂和河道间^[15]。

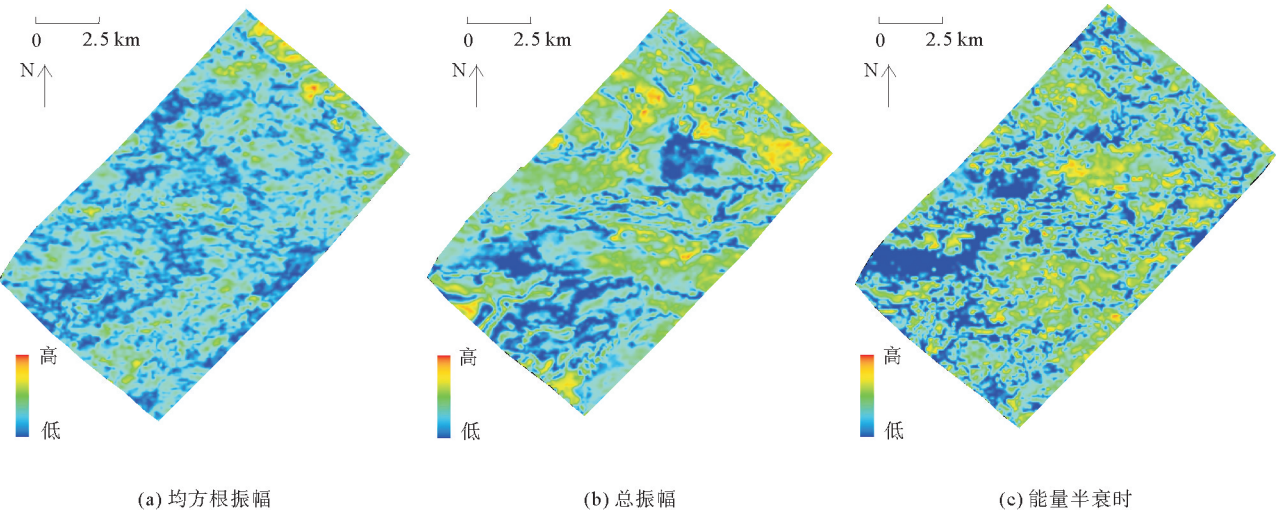


图 9 研究区沙二段三种属性平面分布

Fig. 9 Three attribute plane distributions in the Es₂ of the study area

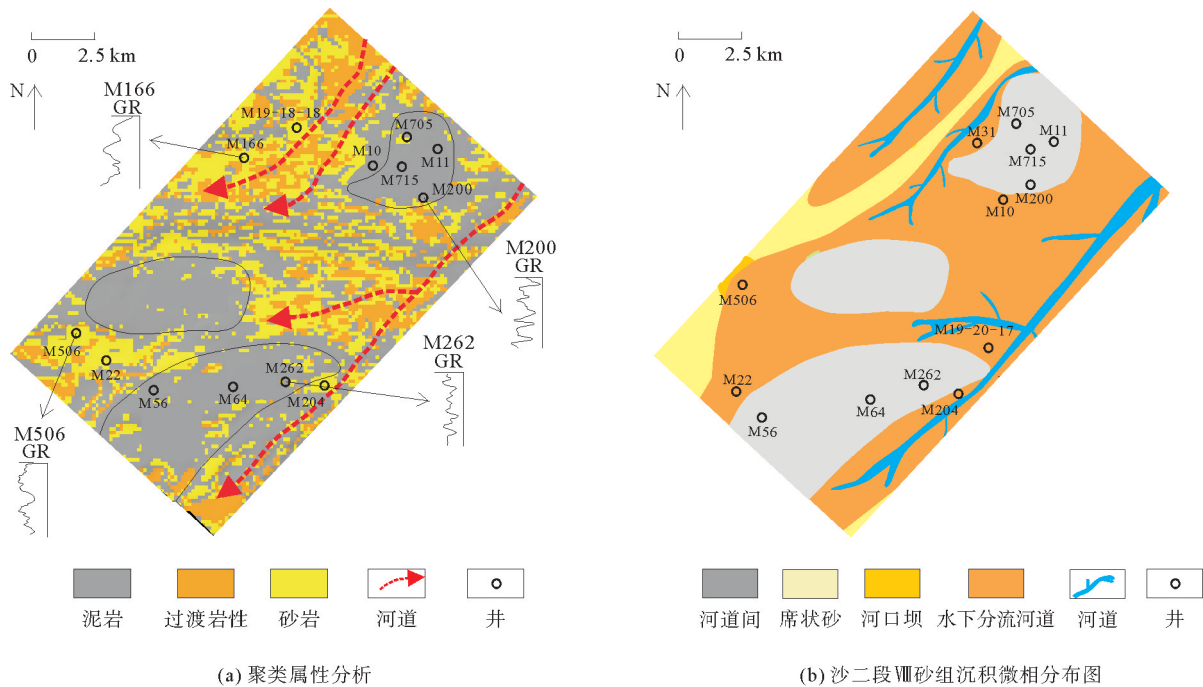


图 10 研究区沙二段属性聚类

Fig. 10 Attribute clustering in the Es₂ of the study area

5 沉积微相分布特征

5.1 平面分布特征

由研究区沙二段砂体展布和沉积相分布规律(图 11)可以得出,沙二段早期(Ⅻ砂组到Ⅺ砂组),受沙三段晚期地层隆起的影响,凹陷区扩张并形成浅水湖盆,中央凸起区的周期性洪水携带的碎屑物质形成扇三角洲沉积,砂体储层物性较好,分布广泛(图 11(a)、11(d))。沙二段中期(Ⅹ砂组到Ⅷ砂组),伴随湖盆的变化水系更加发育,来自北东方向中央凸起的多条河流进入湖盆,砂体较发育,沉积区域逐渐由北东向南西向迁移(图 11(b)、11(e))。沙二段末期(Ⅶ砂组到Ⅵ砂组),水系更发达,多条河流从北东方向进入湖盆,沉积中

心继续向南西方向迁移,南西地区沉积大量砂体(图 11(c)、11(f))。因此,研究区沙二段主要发育水下分流河道微相,呈条带状展布,向两侧厚度逐渐变薄。

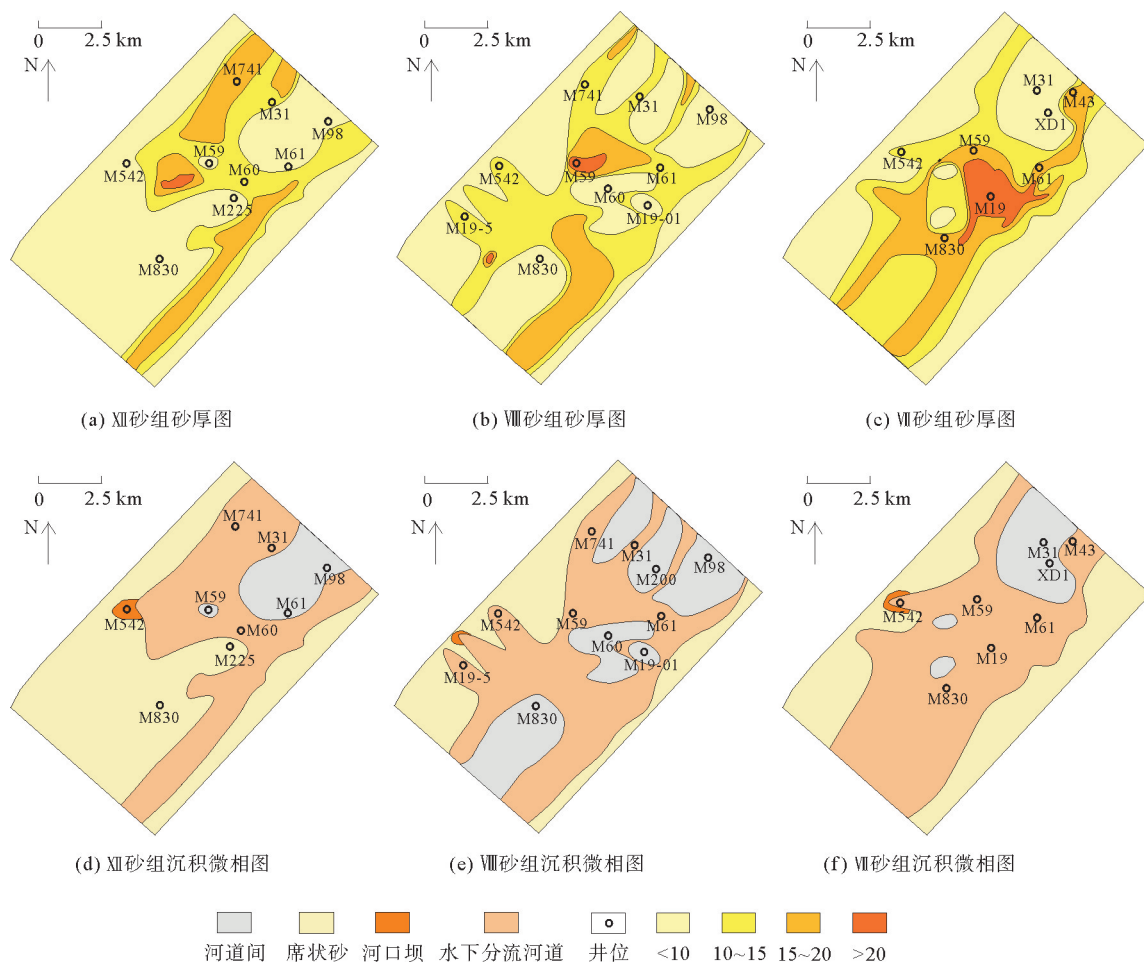


图 11 研究区砂体厚度和沉积相平面图

Fig. 11 Sand body thickness and microfacies plans of the study area

5.2 沉积模式

在砂体展布和沉积微相研究基础上,结合区域地质背景,建立了 HH19 块沙二段的扇三角洲沉积模式(图 12)。辽河拗陷西部凹陷 HH19 块沙二段沉积时期,处于构造活动持续裂陷期和盆地开始扩张时期,地形高差大,呈东高西低、北窄南宽的特征;来自北东方向中央凸起的河流及洪水事件提供了充足的物源,形成了粒度粗、分选差的扇三角洲沉积体系。研究区发育扇三角洲前缘亚相,可划分为水下分流河道、河口坝、河道间、席状砂 4 个沉积微相。区内砂体发育,呈条带状展布,为油气的运移和聚集提供了有利条件^[16]。

6 结论

1) 基于岩石、测井及地震特征的综合研究,采用 90°相位转换、分频处理、地层切片对比、属性聚类分析等技术,刻画了兴隆台油田 HH19 块沉积相和砂体展布规律,建立了沙二段地层的沉积相和地震相模式。

2) 研究区沙二段发育扇三角洲前缘亚相沉积,划分为水下分流河道、河口坝、河道间、席状砂 4 个微相。目的层段砂体较发育,呈三期砂体叠加的特征:一期砂体主要集中在北部以及东南部;二期砂体规模较为连续,呈条带状,整体较薄;三期砂体中部厚度最大,外围逐渐减薄。

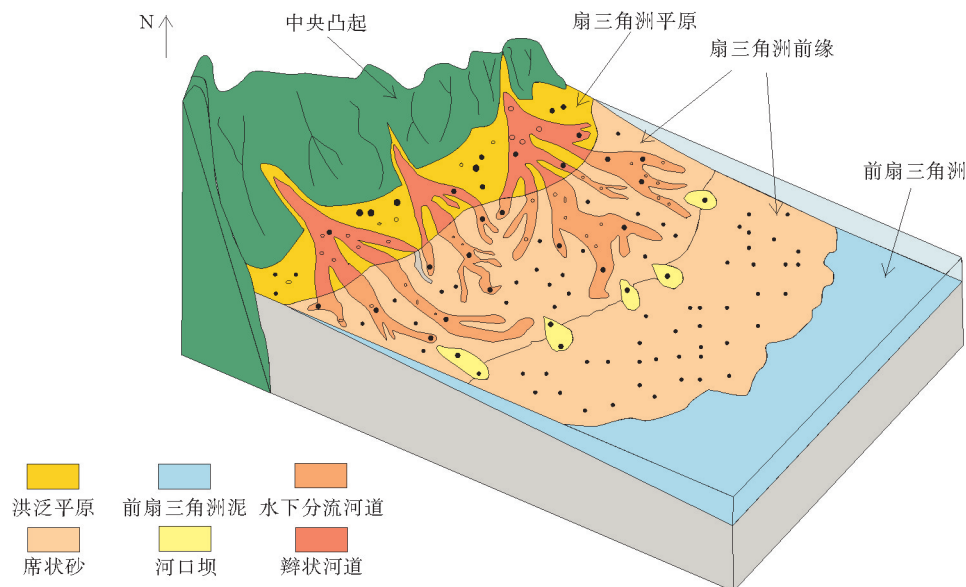


图 12 研究区沙二段扇三角洲沉积模式

Fig. 12 Sedimentary model of the Es₂ fan delta in the study area

3) 沙二段沉积时期,在季节性洪水事件的作用下,来自北东方向的流体携带粗碎屑物质入湖,形成物源供给充足的扇三角洲沉积体系,并具有近源快速沉积的特点,整体处于水进阶段,沉积中心持续前移。

参考文献:

- [1] 朱筱敏,董艳蕾,曾洪流,等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地学报,2020,22(3):397-411.
ZHU Xiaomin,DONG Yanlei,ZENG Hongliu,et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),2020,22(3):397-411.
- [2] LOU M,CAI H,HE X K,et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag,East China Sea shelf basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2023,50(1):138-151.
- [3] 黄凯,秦祎,刘宗宾,等. 辽中凹陷旅大 16 油田东三段层序地层及沉积充填[J]. 高校地质学报,2021,27(5):536-546.
HUANG Kai,QIN Yi,LIU Zongbin,et al. Sequence stratigraphy and sedimentary filling of the third member of the Dongying Formation in the LD16 oilfield,Liaozhong Sag[J]. Geological Journal of China Universities,2021,27(5):536-546.
- [4] 耿晓洁,朱筱敏,董艳蕾. 地震沉积学在近岸水下扇沉积体系分析中的应用:以泌阳凹陷东南部古近系核三上亚段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2016,46(1):57-64.
GENG Xiaojie,ZHU Xiaomin,DONG Yanlei. Application of seismic sedimentology to subaqueous fan complex systems:A case study on Palaeogene He₃ section in Biyang Sag[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2016,46(1):57-64.
- [5] 刘军,王鹏程,陈军,等. 地震沉积学技术在库车坳陷南斜坡白垩系砂体尖灭线识别中的应用[J]. 石油物探,2018,57(5):788-794.
LIU Jun,WANG Pengcheng,CHEN Jun,et al. Identification of the Cretaceous sandbody pinchout line in the south slope of Kuga Depression,China, via seismic sedimentology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(5):788-794.
- [6] 王雅婷,刘峰,王永刚,等. 三维地震致密薄储层预测及水平井导向技术在苏里格气田中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2022,57(增 2):87-91.
WANG Yating,LIU Feng,WANG Yonggang,et al. Application of technologies of tight thin reservoir prediction based on 3D seismic data and horizontal well geosteering in Sulige Gas Field[J]. Oil Geophysical Prospecting,2022,57(S2):87-91.
- [7] 李晓光,陈永成,李玉金,等. 渤海湾盆地辽河坳陷油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质,2021,42(3):291-301.
LI Xiaoguang,CHEN Yongcheng,LI Yujin,et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Liaohe depression in Bohai Bay basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2021,42(3):291-301.

- [8] 林春明,黄舒雅,江凯禧,等. 辽河坳陷大民屯凹陷古近系沙河街组三段沉积相[J]. 地质学报,2023,97(6):2002-2025.
LIN Chunming, HUANG Shuya, JIANG Kaixi, et al. Sedimentary facies of the third Member of Paleogene Shahejie Formation from the Damintun sag, Liaohe depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(6): 2002-2025.
- [9] 王夏斌,姜在兴,胡光义,等. 辽河盆地西部凹陷古近系沙四上亚段沉积相及演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(5):1222-1234.
WANG Xiabin, JIANG Zaixing, HU Guangyi, et al. Sedimentary facies and evolution of upper fourth member of Paleogene Shahejie formation in western sag of Liaohe basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1222-1234.
- [10] 范萌萌,袁珍,李文厚,等. 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组高分辨率层序地层与沉积特征[J]. 西北大学学报(自然科学版),2024,54(6):1050-1064.
FAN Mengmeng, YUAN Zhen, LI Wenhui, et al. High-resolution sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Benxi Formation in Yan'an area of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2024, 54(6): 1050-1064.
- [11] LIU B B, TAN C P, YU X H, et al. Sedimentary characteristics and controls of a retreating, coarse-grained fan-delta system in the lower Triassic, Mahu depression, northwestern China[J]. Geological Journal, 2019, 54(3): 1141-1159.
- [12] 蔡义峰,熊婷,姚卫江,等. 地震多属性分析技术在薄层砂体预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2017,52(增2):140-145.
CAI Yifeng, XIONG Ting, YAO Weijiang, et al. Thin sandstone prediction with seismic multi-attribute analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S2): 140-145.
- [13] 李全,李培俊,倪振,等. 玛湖西斜坡百口泉组扇三角洲地震沉积学研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2020,42(2):15-26.
LI Quan, LI Peijun, NI Zhen, et al. Seismic sedimentary study on the fan-delta of the Baikouquan formation on the western slope of the Mahu sag[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science and Technology Edition), 2020, 42(2): 15-26.
- [14] 章学刚,邓庆杰,熊冉,等. 四川盆地仪陇-平昌地区二叠系长兴组地震沉积学研究[J]. 地质与勘探,2023,59(6):1347-1355.
ZHANG Xuegang, DENG Qingjie, XIONG Ran, et al. Seismic sedimentology of the Permian Changxing formation in the Yilong-Pingchang area, Sichuan basin[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(6): 1347-1355.
- [15] 陈妍,张明振,罗霞,等. 山东埕岛东部东营组三角洲砂体地震预测技术[J]. 中国地质调查,2016,3(2):51-57.
CHEN Yan, ZHANG Mingzhen, LUO Xia, et al. Application of seismic technology to predicting the delta sand body of Dongying Formation in Chengdao eastern slope of Shandong province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(2): 51-57.
- [16] 李守军,徐磊,张祥玉,等. 扇三角洲沉积微相与有利储层的关系:以青东凹陷青东5块沙四上沉积为例[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(3):14-24.
LI Shoujun, XU Lei, ZHANG Xiangyu, et al. Relationship of fan-deltaic microfacies and favorable reservoir: A case study on sedimentary microfacies of the upper submember of Es4 in Qingdong-5 block[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(3): 14-24.

(责任编辑:高丽华)