

三塘湖油田湖 218 地区地震多属性与地震相 在沉积相预测中的应用

徐君¹,张美¹,谢军¹,胡勇^{2*}

(1. 中国石油天然气集团有限公司吐哈油田分公司,新疆哈密 839009;2. 油气地球化学与环境湖北省重点实验室
长江大学 油气地球化学与环境湖北省重点实验室,湖北武汉 430100)

摘要: 三塘湖油田湖 218 区块西山窑组地震反演以及单一地震属性储层预测效果差,砂体展布规律认识不清,制约着油田的开发效果。针对研究区储层预测现状,采取三步走的策略实现了三角洲储层的有效预测:首先分析地震属性与砂地比的关系,优选相关性较高的地震属性,通过多属性拟合得到砂地比展布图,明确沉积相宏观边界特征;其次分析各井沉积微相与地震波形的关系,建立 6 种典型的地震相识别图版;最后结合宏观边界特征与沉积微相地震识别图版绘制研究区沉积微相分布图。结果表明,采用地震多属性拟合与地震相相结合的方法可从宏观和微观两个层次体现沉积微相的展布特征。

关键词: 湖 218 区块;地震相;地震属性;沉积相

中图分类号:P624

文献标识码:A

Application of Seismic Multi Attributes and Seismic Facies in Sedimentary Facies Prediction in Hu 218 Area of Santanghu Oilfield

XU Jun¹, ZHANG Mei¹, XIE Jun¹, HU Yong^{2*}

(1. CNPC Tuha Oilfield Branch, Hami, Xinjiang 839009, China; 2. Hubei Key Laboratory of
Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The seismic inversion and single seismic attribute reservoir prediction of Xishanyao Formation in Hu218 of Santanghu Oilfield have poor results, and the understanding of sand body distribution patterns is unclear, which restricts the development effect of the oilfield. In response to the current situation of reservoir prediction in the research area, a three-step strategy was adopted to achieve effective prediction of delta reservoirs. Firstly, the relationship between seismic attributes and sand to ground ratio was analyzed, and seismic attributes with high correlation were selected. The sand to ground ratio distribution map was obtained through multi-attribute fitting, clarifying the macroscopic boundary characteristics of sedimentary facies; Secondly, analyze the relationship between sedimentary microfacies and seismic waveforms in each well, and establish six typical seismic facies identification charts; Finally, a distribution map of sedimentary microfacies in the study area is drawn by combining macroscopic boundary characteristics with seismic identification diagrams of sedimentary microfacies. The results indicate that the combination of seismic multi-attribute fitting and seismic analysis can reflect the distribution characteristics of sedimentary microfacies from both macro and micro levels.

Key words: Hu218 block; seismic facies; seismic attributes; sedimentary facies

收稿日期:2023-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174019)

作者简介:徐君(1967-),男,新疆哈密人,博士,教授级高级工程师,主要从事油田开发研究工作。

* 通讯作者:胡勇(1980-),男,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事碎屑岩沉积学、储层地质学的研究和教学工作。

三塘湖盆地湖 218 区块侏罗系西山窑组为一套辫状河三角洲前缘的沉积环境,为典型构造岩性复合型油气藏,是近年来已探明的主要潜力区块之一^[1-2]。储层以细砂岩为主,成分成熟度低,具有中低孔、低渗、特低渗的特点,非均质性较强。经多年勘探认为,沉积相带是控制西山窑组优质储层分布的重要因素,三角洲前缘中的水下分流河道、河口坝等沉积微相的物性较好,是油气聚集的有利场所,亦是湖 218 区块西山窑组钻探的主要靶区。

因此,如何准确地刻画西山窑组有利沉积相带的形态和边界,成为湖 218 区块油气勘探急待解决的关键问题之一。本次研究通过对层间地震属性提取,选取与砂地比相关性最高的多种地震属性,通过数学物理解析方法计算砂地比预测模型,进而明确砂体的空间展布。在地震与测井资料的基础上,分析其地震相和沉积相特征,并通过总结地震波形特征,识别出 6 种地震相类型。综合地震波形与地震属性预测结果,完成湖 218 区块沉积相刻画,为下一步井位部署提供依据。

1 区域概况

三塘湖盆地位于新疆巴里坤县和伊吾县境内,盆地狭长,面积较小,具有南北分带、东西分块的构造特点^[3-5]。盆地南缘、北缘均为较高大的山系,向东海拔迅速降低。三塘湖盆地南部为准噶尔地槽,北部为阿尔泰地槽,中部为中央拗陷带,马朗凹陷位于中央拗陷带中南部^[6]。

拗陷带北部为北缘冲断隆起带,南侧为南缘逆冲推覆带。马朗凹陷北缘存在两个以东北-南西方向倾伏的鼻隆带,分别是牛圈湖和马中鼻隆带。两个鼻隆带之间以凹槽相隔。马朗凹陷总体上呈现东高西低的趋势。湖 218 区块位于马朗凹陷西北部呈近东西向展布的构造带上^[7];湖 218 主要为辫状河三角洲前缘沉积,偶见碎屑流的沉积作用^[8-9]。

研究区西山窑组分为 J₂X₁, J₂X₂ 两段,本次研究中目的层 J₂X₂ 段可进一步细分为 J₂X₂¹, J₂X₂², J₂X₂³ 三个小层(图 1)。

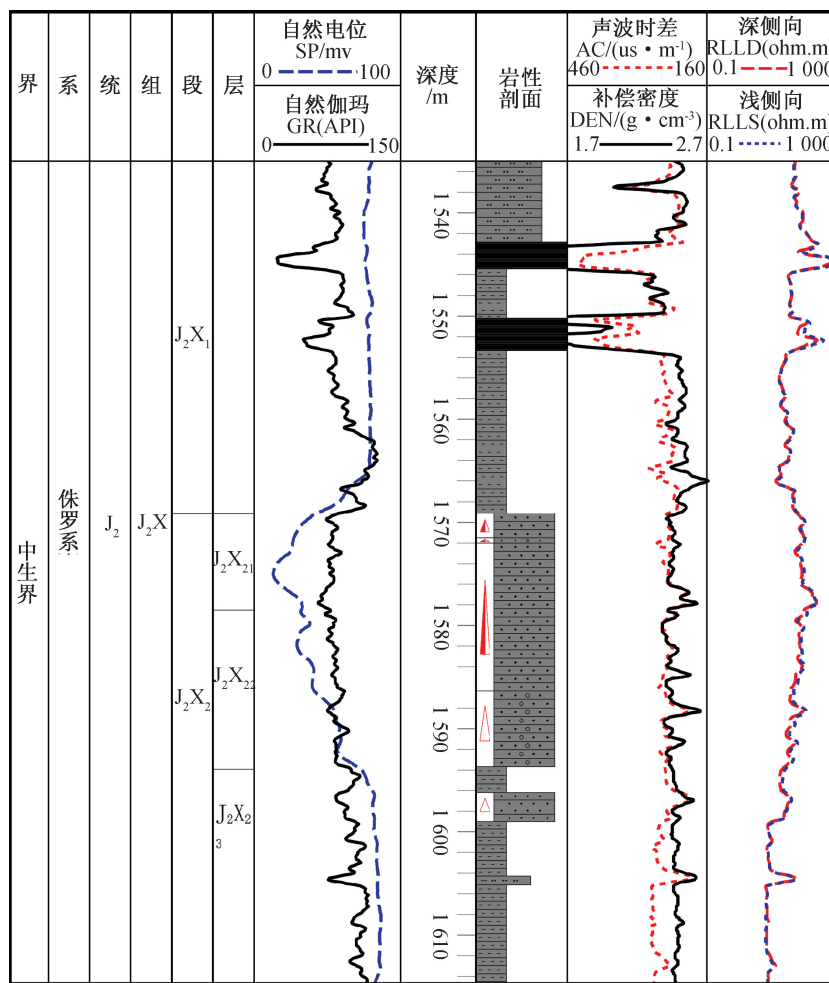


图 1 三塘湖盆地湖 218 井综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive Bar Chart of Santanghu Basin

三塘湖盆地侏罗系西山窑组二段(J_2X_2)主要发育灰色中-细砂岩及灰色泥岩,伽马测井曲线表现为漏斗状的复合型曲线特征,总体为湖退过程; J_2X_2 上部发育两套煤层,测井曲线表现为低伽马、低密度、低声波、高电阻,可作为本次研究的标志层。

2 地震属性分析

地震数据有其分布广、密度大的特点,能全面直观地反映盆地构造形态和沉积体的展布。将地震属性与测井数据综合考虑,更能准确地预测储层的展布规律^[10-13]。

本文通过提取地震沿层属性,分析各类地震属性对砂体的响应特征,最终明确砂体展布规律。 J_2X_2 的顶部在研究区广泛发育一套煤层(图 1),地震轴显示为一套强波峰,可作为地震追踪的标志层; J_2X_2 的底部与下伏地层泥岩突变接触,为一个不整合面,地震轴同样显示为一套波峰,因其反射系数较砂-煤层要小,地震反射强度也相对较弱(图 2)。本文为保留目的层的全部地震信息,将顶底两个地层界线上、下漂移 3 ms(整体时窗厚度约为 14.5 ms),提取相应的地震属性。

2.1 地震属性优选

地震属性优选就是从所有地震属性中挑选最能反应研究区储层特征的地震属性集,以期望优

化地震多解性导致的问题,提高储层预测精度。本文通过分析井点处的各种属性与砂地比的相关性进而优选相关性最高的几类地震属性来拟合砂地比。其中两个变量的相关性关系可直观地用散点图表示(图 3)。当判别系数 R^2 越大,说明样本线性回归的效果越好。本次研究共统计了 186 口井的砂地比及对应的各种地震属性(约 39 种),从拟合结果中优选出 9 种与砂地比相关性最高的地震属性用于砂体预测,包括弧长、平均能量、最大震级、平均包络、平均震级、最小振幅、最大振幅时间、RMS、上半周偏斜(图 4)。

由于地震数据的多解性,难以用一种地震属性准确预测砂体的展布规律。因此,常规线性分析自然地扩展到多属性(多变量线性回归)分析。通过逐步回归的方法,逐渐增加参与分析的属性数量,并计算每个属性的权重,使预测值与目标值之间的误差最小,最终确定参与分析的属性(图 5)及其权重系数,多变量线性回归公式如下:

$$Y = 49.67 + a * A_1 + b * A_2 + c * A_3 + d * A_4 + e * A_5 + f * A_6 + g * A_7 + h * A_8 + i * A_9 \quad (1)$$

各参数含义如表 1 所示。

本次研究用数学模型来表现两者之间的具体关系,通常认为,当 $R^2 < 0.5$ 时,回归分析所得的数学模型相关性太低,而 $R^2 > 0.8$ 时,则数学模型没有预测目的。当 $0.5 < R^2 < 0.8$ 时,所得数学模型较

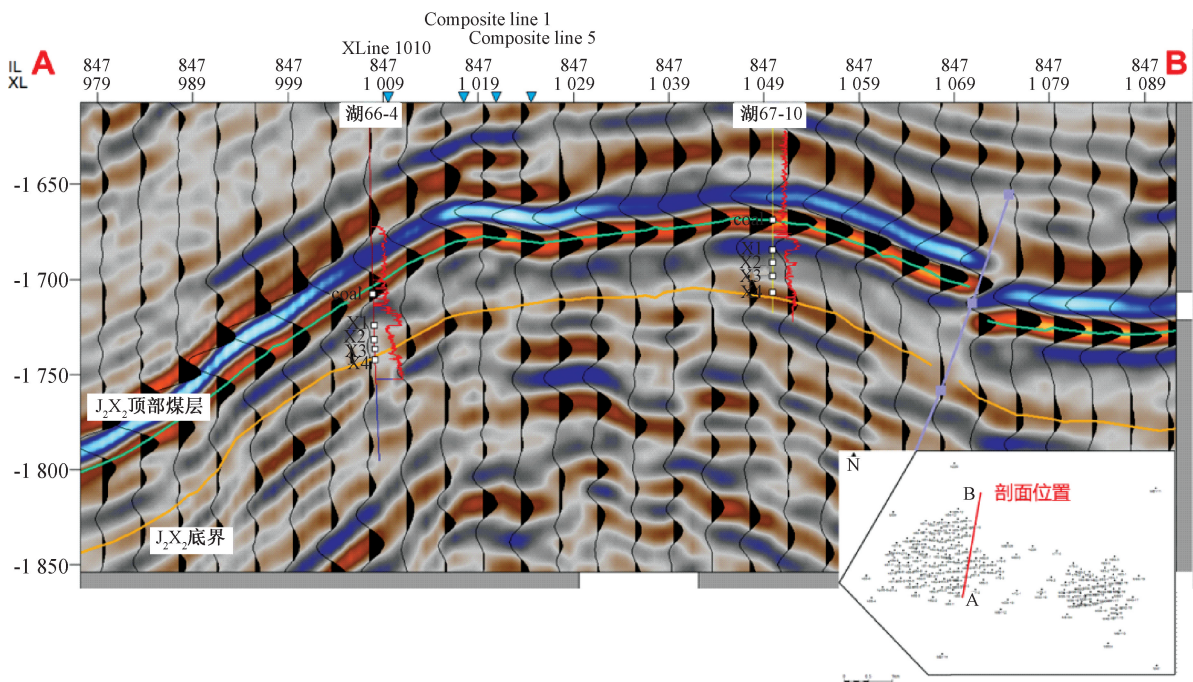


图 2 湖 66-4 井—湖 67-10 井地震剖面图
Fig. 2 Seismic Profile of Well Hu 66-4 to Well Hu 67-10

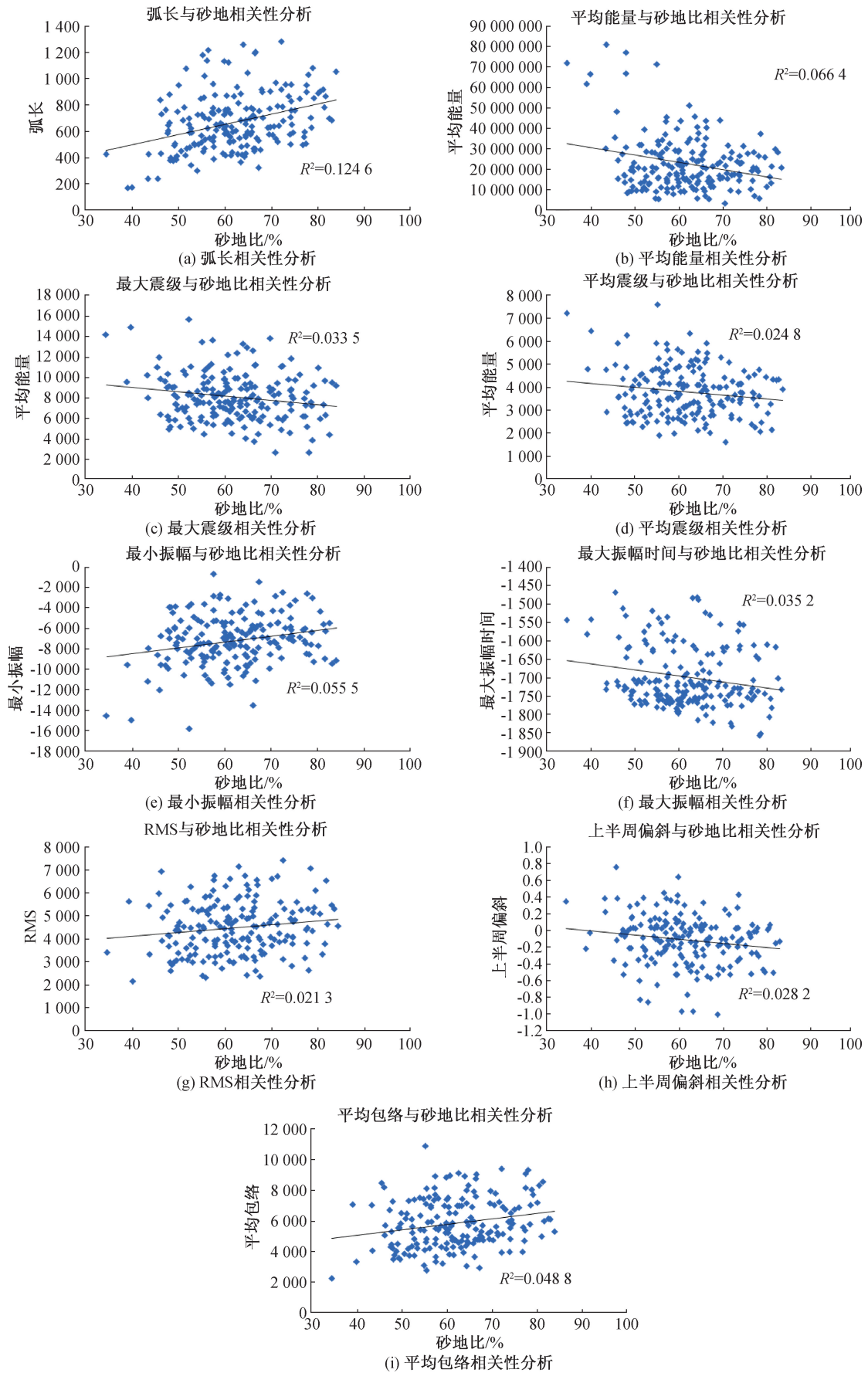


图3 湖218地震属性与砂地比相关性分析

Fig. 3 Correlation Analysis of Hu218 Seismic Attribute and Sand Ground Ratio

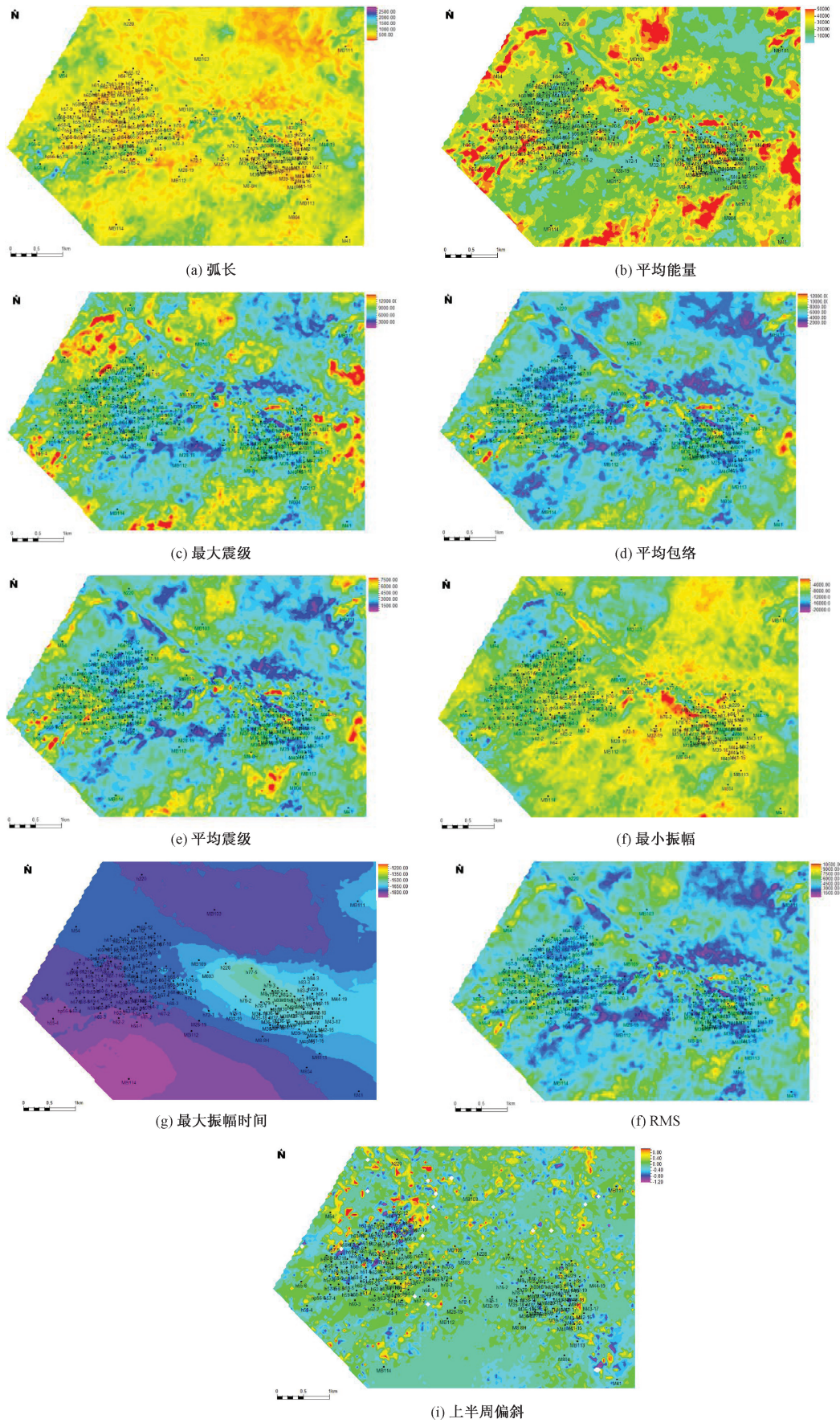


图 4 湖 218 井区地震属性展布图

Fig. 4 Distribution of Seismic Attributes in Well Block Hu 218

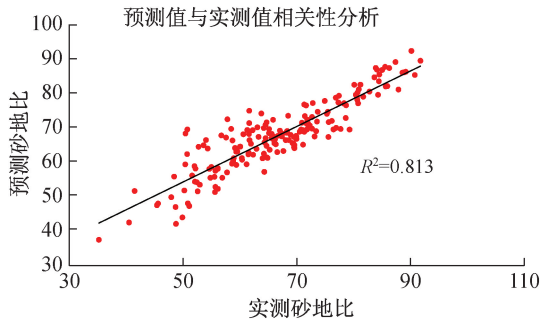


图5 湖218井区实测砂地比与预测值相关性分析
Fig. 5 Correlation Analysis of Measured Sand to Ground Ratio and Predicted Values in Well Block Hu 218

表1 公式1各参数含义

Tab. 1 Meaning of each parameter in formula 1

系数	值	变量	含义
<i>a</i>	-0.003 907	A_1	弧长
<i>b</i>	-8.85×10^{-7}	A_2	平均能量
<i>c</i>	0.001 44	A_3	平均包络
<i>d</i>	-0.003 766	A_4	平均震级
<i>e</i>	-0.000 587	A_5	最大震级
<i>f</i>	0.002 213	A_6	最小振幅
<i>g</i>	-0.000 812	A_7	最大振幅时间
<i>h</i>	-4.791 102	A_8	上半周偏斜
<i>i</i>	0.014 203	A_9	RMS(均方根振幅)
		<i>Y</i>	砂地比/%

为可靠。本次研究的最终预测值与实测值的相关性达0.813(图5)。通过统计湖218区预测砂地比

与实际砂地比之间的误差发现:误差小于等于5%的井数达141口,误差在5%~10%之间的有35口,误差值大于10%的井12口,预测精度达95%,拟合度较高。

2.2 砂地比平面展布

据前人研究,研究区存在南北两个物源三角洲体系^[6,8],但对三角洲的平面展布规律研究尚浅,通过公式一,得到地震多属性预测的砂地比展布图(图6),进而明确湖218井区 J_2X_2 的砂体展布特征,分析认为北部与南部分别有3个物源体系的展布样式,其中东南部朵叶体较大,西南部朵叶体次之,西北部朵叶体最小,整体而言中部砂体较厚。

3 典型地震相类型及特征

地震相是特定的沉积相或地质体宏观特征的地震反射,可利用地震反射内部结构和外部形态来描述各层段地震相类型。不同的岩性组合、层理以及沉积特征都会引起地震参数(反射结构、几何外形、振幅、频率及连续性等)的变化^[14-18]。通过井震标定(图7、图8)及测井相识别,总结地震相特征,以优势相将目的层划分为分流河道与河口坝两类(表2)。

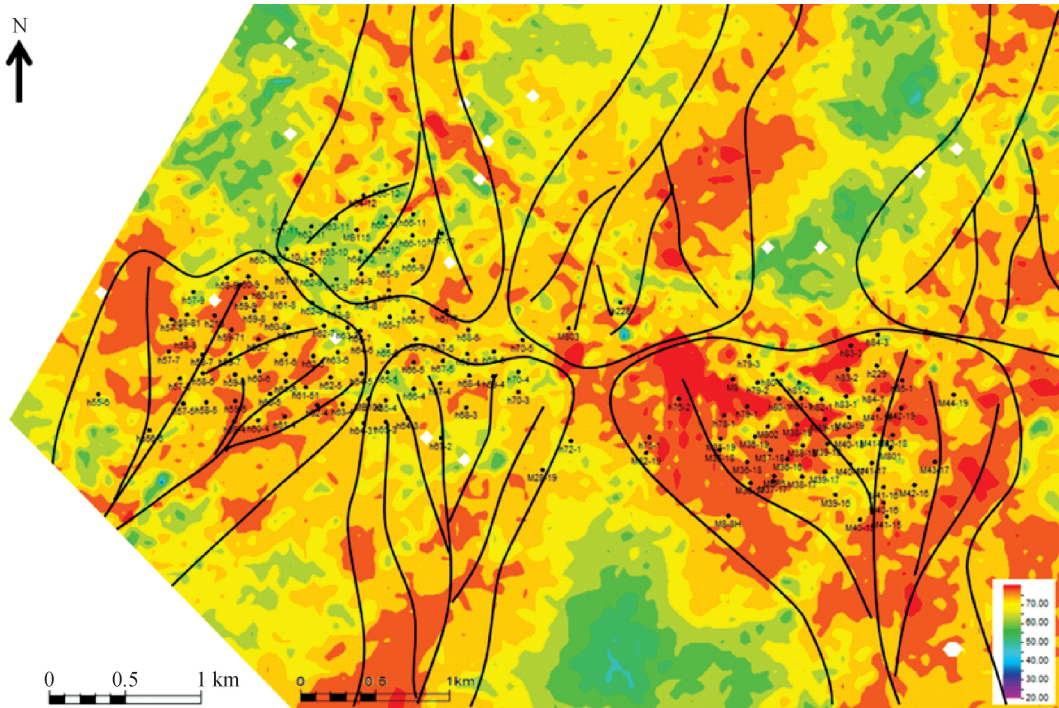


图6 湖218地震多属性预测砂地比平面展布图

Fig. 6 Multi attribute prediction of sand ratio in the Hu 218 earthquake

表 2 典型地震相特征

Tab. 2 Characteristics of Typical Seismic Facies

类型	井名	岩性柱	沉积序列	典型地震相	频谱图	主频 /Hz	连续性 /km		深度范围 /m	描述
							顺物源	垂直物源		
双波谷耳状波形	马206					26	0.93	1	832~888	河道沉积, 砂体垂向上可见较厚夹层。
鼻状波形	湖47-13					27.5	1.9	0.8	1 558~1 623	河道沉积, 砂体底部发育分流间湾。
低频宽缓对称波形	马17					29.2	1.7	2.7	983~1 042	河道沉积, 砂体底部发育分流间湾, 厚度较大。
垂线状波形	湖78-1					36.5	1.1	1.6	1 120~1 187	河口坝沉积, 底部发育分流间湾, 厚度较薄。
反鼻状波形	湖61-10					25.5	1.55	2.0	1 410~1 480	河口坝沉积, 底部发育分流间湾, 厚度较薄。
强波峰双波谷耳状波形	马209					37.4	1.8	2.3	732~792	河口坝沉积, 底部发育分流间湾, 厚度较薄。

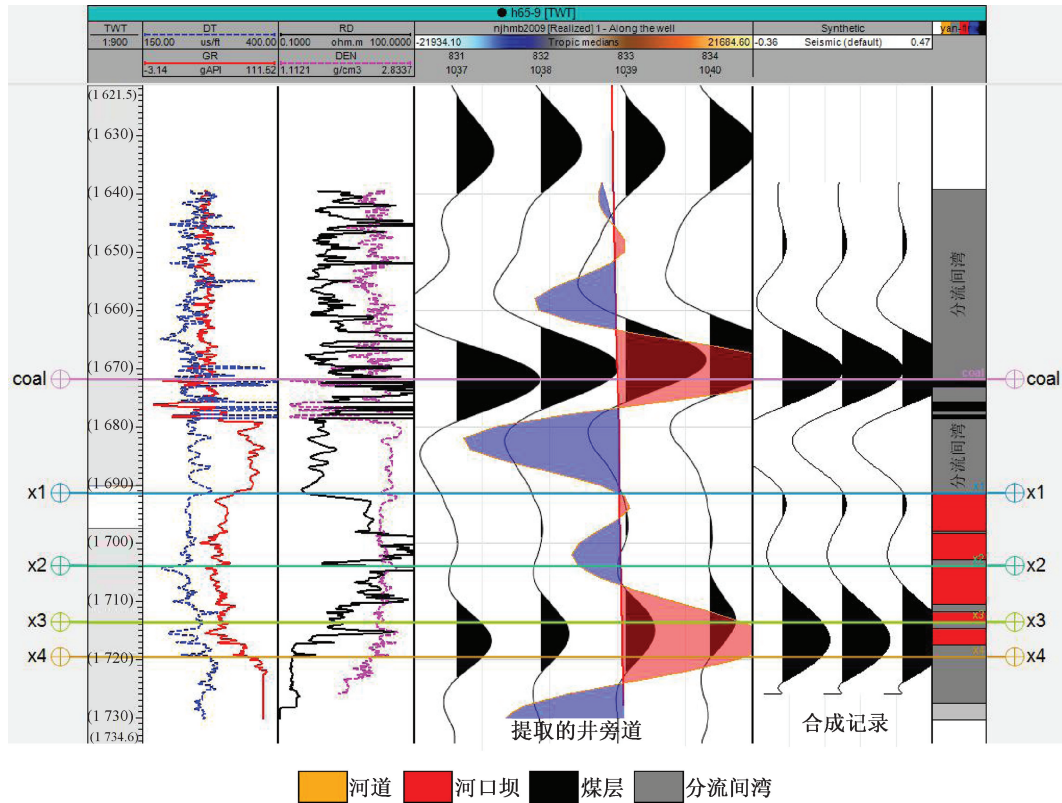


图 7 湖 65-9 井震标定结果(以河口坝沉积为主)

Fig. 7 Calibration Results of Well 65-9 Earthquake in Lake (Mainly Sedimentation of River Mouth Dam)

传统的地震地层学岩性识别方法是通过肉眼观测地震剖面上的反射特征来划分地震相和沉积相,从而间接预测岩性,即俗称“相面法”的地震相分析法。笔者依据该区高精度三维地震资料,从传统的地震相研究出发,对研究区西山窑组内地震相进行了分析,共识别出 6 种典型地震相,包括

双波谷耳状波形地震相、鼻状波形地震相、低频宽缓对称波形地震相、垂线状波形地震相、反鼻状波形地震相以及强波峰双波谷耳状波形地震相。根据不同微相测井曲线形态明确对应的地震反射波形特征,建立地震相微相图版,表征微相分布(表 2)。

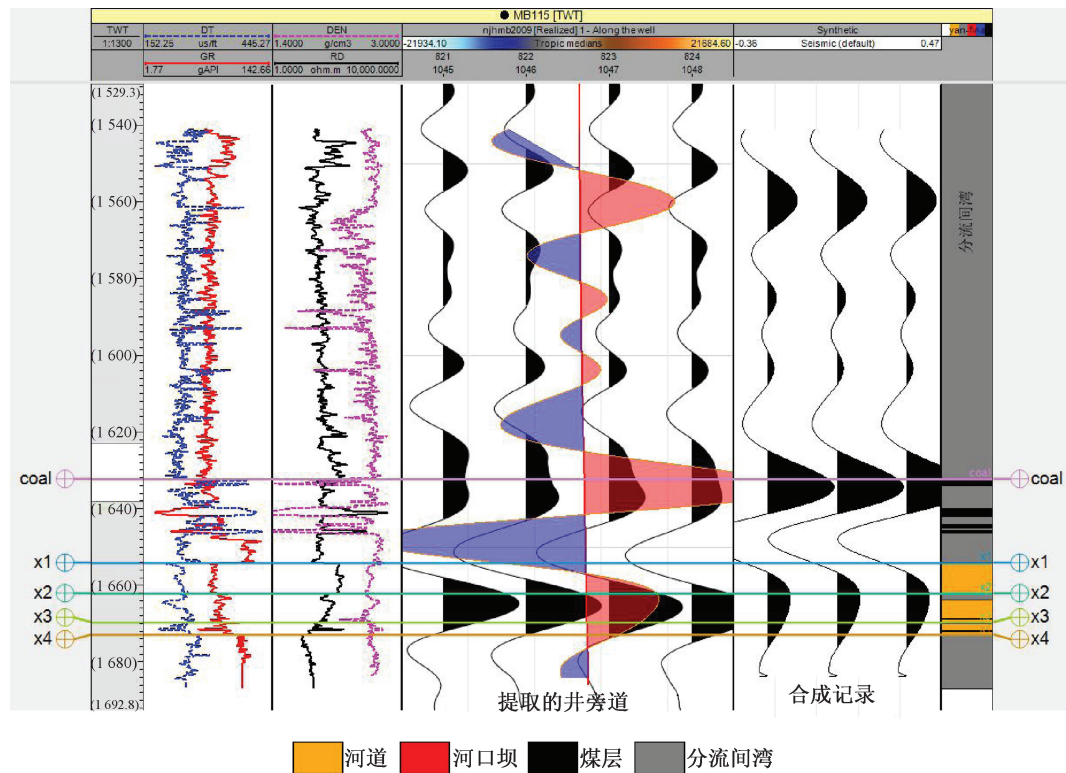


图8 马北115井震标定结果(以河道沉积为主)

Fig. 8 Seismic calibration results of Lake 64-7 (mainly river sedimentation)

3.1 双波谷耳状波形地震相

双波谷耳状波形地震相在工区内分布较广,该地震相振幅较强,反射同相轴连续,呈长轴状近平行反射(图9(a))。两波峰间的波谷反射轴呈耳状,主频在26 Hz,主要分布于832~888 m之间。顺物源与垂直物源连续性大致相同。代表着相对稳定的平缓地貌背景下的匀速沉积,所形成的地层厚度差异较小。对应的分流河道砂体垂向上可见较厚夹层。

3.2 鼻状波形地震相

该地震相振幅较双波谷耳状波形地震相比较弱,反射同相轴连续,两波峰间距向一侧增大,如图9(b)所示。两波峰间的波谷反射轴呈鼻状,主频在27.5 Hz,主要分布于1558~1623 m之间。顺物源连续性大于垂直物源连续性。通常具有楔状外形,多显示地层向另一侧发散增厚的特征。对应河道沉积,砂体底部发育分流间湾。

3.3 低频宽缓对称波形地震相

低频宽缓对称波形地震相在工区内分布较广,该地震相上部波峰较强,下部波峰较弱,上部波峰反射同相轴连续,见图9(c)。两波峰间的仅有一个波谷反射轴,近平行反射。主频在29.2 Hz,主要分布于983~1042 m之间。顺物源连续性略

小于垂直物源连续性。代表着相对稳定的平缓地貌背景下的匀速沉积。代表水下分流河道沉积,砂体底部发育分流间湾,厚度较大。

3.4 垂线状波形地震相

该地震相以线状为主,内部偶见弱波谷反射,见图9(d)。主频在36.5 Hz,主要分布于1120~1187 m之间。顺物源连续性与垂直物源连续性大致相同。地震相通常具收敛,多显示地层向另一侧减薄的特征。代表河口坝沉积,底部发育分流间湾,厚度较薄。

3.5 反鼻状波形地震相

反鼻状波形地震相上部波峰较强,下部波峰较弱,上部波峰反射同相轴连续,呈长轴状近平行反射,见图9(e)。两波峰间的相距有一个波谷反射轴。波谷反射轴像反着的鼻子。主频在25.5 Hz,主要分布于1410~1480 m之间。顺物源连续性与垂直物源连续性大致相同,该特征代表着相对稳定的平缓地貌背景下的匀速沉积。反鼻状波形地震相指示河口坝沉积,底部发育分流间湾,厚度较薄。

3.6 强波峰双波谷耳状波形地震相

强波峰双波谷耳状波形地震相仅在工区西北部局部地区有所分布,该地震相振幅较强,反射同

相轴连续,呈长轴状近平行反射,见图 9(f)。两波峰间夹有一道较明显的波峰反射轴,主频在 37.4 Hz,主要分布于 732~792 m 之间。顺物源连续性略小于垂利物源连续性。对应河口坝沉积,底部发育分流间湾,厚度较薄。

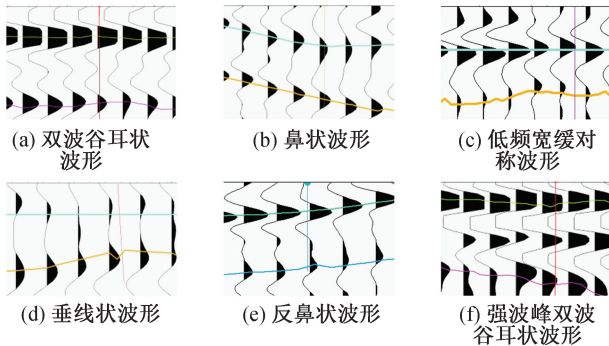


图 9 典型地震相

Fig. 9 Typical seismic facies

4 沉积相特征及分析

不同的地震相虽然通常可以代表着不同的沉积环境与沉积产物,但具体分析地震相所代表沉积相时需将地震资料进行综合分析,取得具有较高可信度的解释方案。因此,在井标定的条件下,以地震多属性拟合确定三角洲宏观分布规律,明确了沉积边界,然后对工区内各种地震相类型进行识别,在考虑盆地特征和地质资料的基础上,综合分析研究区的单井相,并通过典型单井相与地震相标定,建立湖 218 井区沉积相图(图 10)。主要的沉积微相为水下分流河道、河口坝、分流间湾。

由地震相图(图 10)可以看出,低频宽缓对称波形、鼻状波形地震相在全区分布较广。反鼻状波形地震相主要分布于工区西部,双波谷耳状波形地震相主要分布于工区东部。低频宽缓对称波形主要分布在工区中部。强波峰双波谷耳状波形在仅在工区西北部局部地区有所分布。

湖 218 区块的河道沉积呈正粒序特征,储层主要以油层为主,其中,河道对应鼻状波形地震相;河口坝呈反粒序,储层以油层、差油层为主,地震相波形以垂线状、反鼻状为主(图 10)。

盆地北缘相对南缘地形较陡,自西至东井区内连片发育粗粒辫状河三角洲体系,随着物源的持续供给,河道不断侧向迁移、叠加,砂体连续厚度大,平面上顺物源方向延伸较远,可延伸到湖盆中央与南侧物源交汇。在盆地南缘,西山窑沉

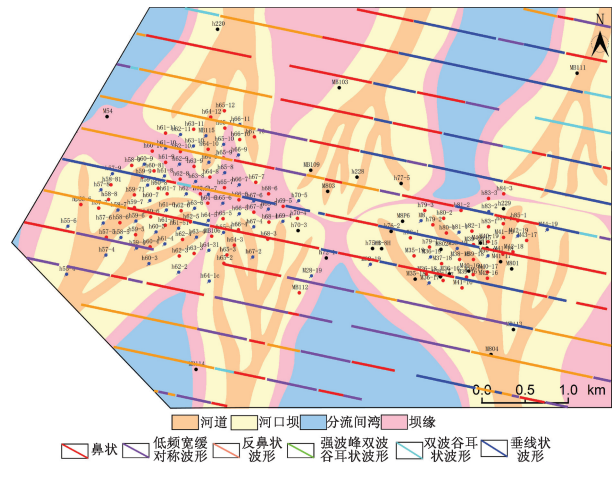


图 10 湖 218 西山窑组沉积相图

Fig. 10 Sedimentary Facies of Hu218 Xishanyao Formation

积时期整体地势较为平缓,辫状河三角洲单独发育,不像盆地北缘那样连片分布,但每个辫状河三角洲体系均延伸较远,在盆地中央与北部物源进行交汇^[19-20]。

通过对砂体厚度、砂地比值的统计,编制了 $J_2X_2^1$ 、 $J_2X_2^2$ 与 $J_2X_2^3$ 的沉积微相图,进一步在相控前提下,结合河道走向及过渡带交叉发育情况,进行相控砂体展布预测。

$J_2X_2^3$ 时期主要发育辫状河三角洲前缘水下分流河道和分流间湾沉积微相,由于物源控制沿北西-南东方向发育三个规模较小的独立的三角洲朵体,沿南-北方向发育四个朵状三角洲,见图 11(a)。

$J_2X_2^2$ 时期为湖侵体系域,沉积相比上层分布的区域要更广。各区块均以辫状河三角洲前缘亚相沉积为主,水下分流河道是主要的沉积微相,水下分流河道频繁摆动、迁移,相互切割,砂体连片发育。沿东北-西南方向发育四个三角洲朵体,西南-东北方向发育三个辫状河三角洲朵体,东南-西北方向发育一个辫状河三角洲朵体,图 11(b)。

$J_2X_2^1$ 时期沉积辫状河三角洲前缘水下分流河道、河口坝和分流间湾沉积微相。由于物源控制沿东北-西南方向发育三个三角洲朵体,西南-东北方向发育三个辫状河三角洲朵体,东南-西北方向发育一个辫状河三角洲朵体,见图 11(c)。

5 结论

1) 本文优选出 9 种地震属性拟合砂地比,在研究区内识别出 6 个朵叶体,其中东南部朵叶体较大,西北部朵叶体最小。

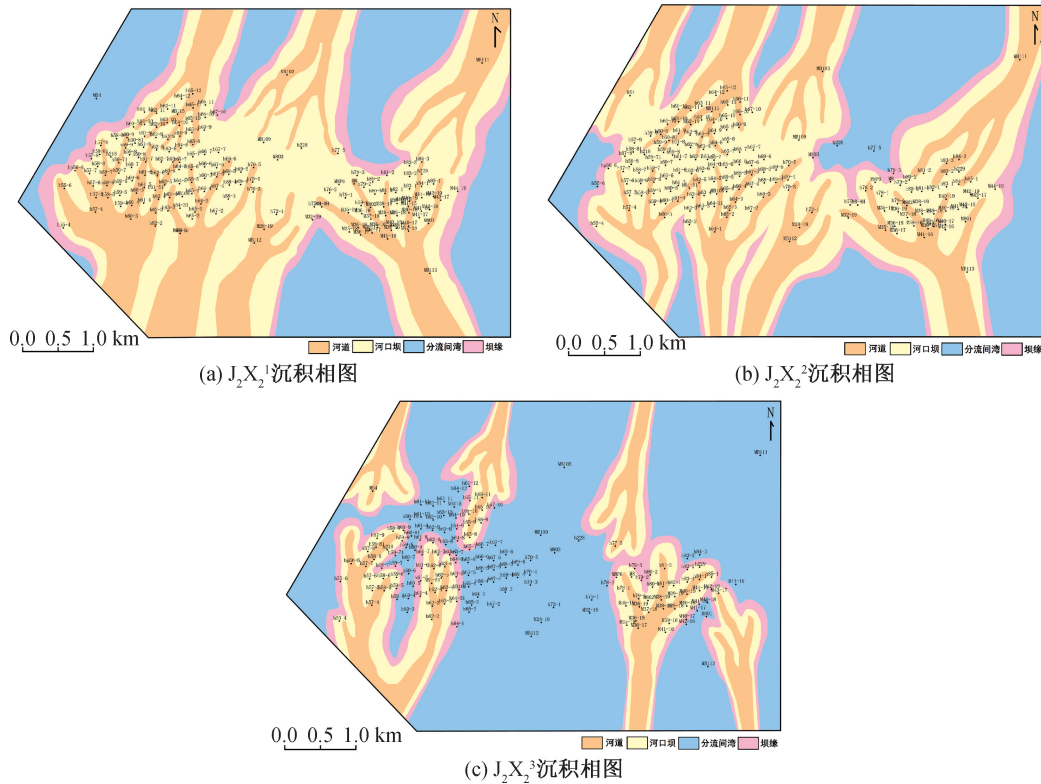


图 11 湖 218 区块各小层沉积相图

Fig. 11 Sedimentary Facies of Each Sublayer in Hu218 Block

2)建立了六种地震相模式,其中分流河道对应于双波谷耳状波形、鼻状波形、低频宽缓对称波形,河口坝对应于垂线状波形、反鼻状波形、强波峰双波谷耳状波形。

3)三塘湖盆地湖 218 区块西山窑组 $J_2X_2^3$ 砂体展布范围最小,横向上不连续; $J_2X_2^1$ 与 $J_2X_2^2$ 砂体展布范围较大,平面上连续性较好。

参考文献:

- [1] 于锋,石家雄,魏跃程,等. 三塘湖盆地湖 218 区块西山窑组储层评价[J]. 内蒙古石油化工,2015,41(15): 38-43.
- [2] 路阳. 低渗稠油油藏热水驱油机理研究[D]. 武汉: 长江大学,2014.
- [3] 马强,白国娟,闫立纲. 三塘湖盆地芦草沟组致密储层特征及其“甜点”选择[J]. 新疆石油天然气,2017,13(01): 1-5+107.
- [4] 于刚. 三塘湖盆地马朗凹陷中侏罗统西山窑组油藏形成条件分析[J]. 西部探矿工程,2017,29(12): 37-40.
- [5] 方向,杨智,吴因业. 三塘湖盆地芦草沟组致密油富集主控因素分析[J]. 地质论评,2021,67(S1): 217-218.
- [6] 袁文俊. 三塘湖盆地马朗凹陷中侏罗统西山窑组沉积相研究[D]. 成都:成都理工大学,2019.
- [7] 张孝合,徐胜林,胡军,等. 三塘湖盆地牛圈湖南-马中地区西山窑组一段储层特征及主控因素[J/OL]. 矿物岩石,1-14[2023-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1143.td.20231123.1117.002.html>.
- [8] 林刚山,钟建华,倪良田,等. 三塘湖盆地马朗凹陷西山窑组层序地层及沉积相研究[J]. 河南科学,2017,35(08): 1316-1322.
- [9] 司学强,郭沫贞,杨志力,等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷侏罗系西山窑组沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报,2015,17(04): 553-564.
- [10] 李斌,苏洲,孙琦,等. 超深薄储层综合预测技术在英买力地区的应用[J]. 石油地球物理勘探,2018,53(S2): 272-278+18.
- [11] 杜浩坤,蔡其新,肖斌,等. 普光地区中三叠统雷口坡组顶部储层分布预测[J]. 石油地球物理勘探,2017,52(06): 1269-1279+1122-1123.
- [12] 刘文岭,牛彦良,李刚,等. 多信息储层预测地震属性提取与有效性分析方法[J]. 石油物探,2002(01): 100-106.
- [13] 刁宛,童姜楠,张宝权,等. 相控反演预测致密薄砂层分布[J]. 石油地球物理勘探,2022,57(S1): 172-176+15.
- [14] 陈程,王利,赵为永,等. 柴东地区欧南凹陷上石炭统地震相及沉积展布特征[J/OL]. 地质力学学报,1-13[2023-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/de>

- tail/11.3672.P.20231020.1123.002.html.
- [15] 张自力,李琦,朱筱敏,等. 陆相断陷湖盆重力流湖底扇沉积与地震响应特征分析:以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组为例[J]. 古地理学报,2023,25(05):1049-1068.
- [16] 刘芳,何卫军,杨璐,等. 珠江口盆地珠三坳陷西部神狐组地震相与沉积特征[J]. 石油地质与工程,2023,37(05):33-37+45.
- [17] 黎祺,陆嫣,何贤科,等. 基于地震波形分类的三角洲储层刻画与应用——以西湖凹陷J气田为例[J]. 科学技术与工程,2022,22(17):6847-6856.
- [18] 桑凯恒,张繁昌,李传辉. 地震倒谱特征参数谱聚类地震相分析方法[J]. 石油地球物理勘探,2021,56(01):38-48+5-6.
- [19] 谷东辉. 三塘湖盆地马朗凹陷西山窑组沉积体系及储层特征研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2021.
- [20] 张利伟,严德天,刘文慧,等. 三塘湖盆地条湖凹陷中侏罗统西山窑组层序地层及聚煤规律[J]. 煤炭学报,2019,44(02):545-556.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第94页)

参考文献:

- [1] 王舒菲,高鹏.“双碳”目标下煤炭行业转型必要性及路径探究[J]. 中国煤炭,2022,48(03):9-14.
- [2] 杜悦英. 对焦“双碳”目标,践行绿色发展[J]. 中国发展观察,2021(07):12-14.
- [3] LI Y, WANG G, LI Z, et al. A Life Cycle Analysis of Deploying Coking Technology to Utilize Low-Rank Coal in China[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 4884.
- [4] YANG Y, XU J, LIU Z, et al. Progress in Coal Chemical Technologies of China[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2019, 36(1): 21-66.
- [5] XUE F, LI D, GUO Y, et al. Technical Progress and the Prospect of Low-rank Coal Pyrolysis in China[J]. Energy Technology, 2017, 5(11): 1897-1907.
- [6] HUANG Y, LI W, WU G, et al. Comparative Analysis of Typical Low Rank Coal Pyrolysis Technology Based on a Nonlinear Programming Model[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(11): 12977-12987.
- [7] 臧娜,和凤祥,王海洋,等. 高附加值煤沥青制备及应用研究进展[J]. 辽宁化工,2021,50(08):1166-1171.
- [8] ZHU Y, SUN S, XU Y, et al. Preparation and Characterization of Pitch Coke from Oxidized Polymerized Pitch[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2020, 15(5): e2497.
- [9] ZHU Y, ZHAO C, XU Y, et al. Preparation and Characterization of Coal Pitch-based Needle Coke (Part I): The Effects of Aromatic Index (fa) in Refined Coal Pitch[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(4): 3456-3464.
- [10] CRADDOCK J D, RANTELL T D, HOWER J C, et al. Anode Coke from Coal-A Low Cost Approach[J]. Fuel, 2017, 187: 229-241.
- [11] HUANG X, KOCAEFE D, KOCAEFE Y. Utilization of Biocoke as a Raw Material for Carbon Anode Production[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(8): 8537-8544.
- [12] REN W, ZHANG Z, WANG Y, et al. Preparation of Porous Carbon Microspheres Anode Materials from Fine Needle Coke Powders for Lithium-ion Batteries[J]. RSC advances, 2015, 5(15): 11115-11123.
- [13] CHEN S, XIE S, FAN C, et al. Microstructure and Performance of Carbonization Products of Component from Soft Coal Pitch[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2018, 22(3): 316-321.
- [14] QIAN W, LI X, ZHU X, et al. Preparation of Activated Carbon Nanofibers Using Degradative Solvent Extraction Products Obtained from Low-rank Coal and their Utilization in Supercapacitors[J]. RSC Advances, 2020, 10(14): 8172-8180.
- [15] 唐闲逸,魏晓慧,许德平,等. 中温煤沥青喹啉不溶物的脱除及炭化制备针状焦[J]. 材料研究学报,2016,30(6):448-456.
- [16] 程时富,张元新,常鸿雁,等. 煤直接液化残渣的萃取和利用研究[J]. 煤炭转化,2015,38(04):38-42.
- [17] 虞育杰,姜红丽,龚德鸿,等. 低阶煤分级利用技术研究综述[J]. 广东电力,2018,31(3):9-14.
- [18] MORGA R, JELONEK I, KRUSZEWSKA K, et al. Relationships Between Quality of Coals, Resulting Cokes, and Micro-Raman Spectral Characteristics of These Cokes[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 144: 130-137.
- [19] TRITTSCHACK R, GROBÉTY B, BRODARD P. Kinetics of the Chrysotile and Brucite Dehydroxylation Reaction: A Combined Non-isothermal/Isothermal Thermogravimetric Analysis and High-temperature X-ray Powder Diffraction Study[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2014, 41: 197-214.
- [20] RANTITSCH G, BHATTACHARYYA A, SCHENK J, et al. Assessing the Quality of Metallurgical Coke by Raman Spectroscopy[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 130: 1-7.

(责任编辑 周雪梅)