

殷文. 低勘探程度地区层序地层分析及沉积规律:以五墩凹陷侏罗系为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 70–83. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230009.

Yin Wen. Sequence Stratigraphic Analysis and Sedimentary Law Research in Low Exploration Area: Take the Jurassic in Wudun Depression as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 70–83. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230009.

低勘探程度地区层序地层分析及沉积规律 ——以五墩凹陷侏罗系为例

殷 文

中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 新疆 克拉玛依 834000

摘要:五墩凹陷属于低勘探程度地区,下侏罗统露头区油源条件较好,多口钻井油气显示良好,但盆地层序地层格架不明确,层序空间演化特征和沉积分布规律尚不清楚,制约了下一步的勘探部署。本文综合应用测井、地震、岩心、分析化验等资料,开展五墩凹陷中下侏罗统层序地层划分和区域层序地层格架研究。首先,采用测井频谱属性趋势分析、时频分析、地球化学分析等多种方法划分层序,共划分了 6 个三级层序,28 个四级层序。然后,利用匹配子波分解和重构方法提高地震资料分辨率,采用地震多属性降维融合技术和井震联合多尺度匹配技术进行层序分析,建立了该区侏罗系层序地层格架。之后,将测井层序划分结果与地震多属性融合分析结果进行交叉验证,明确层序空间演化特征。最后,在高精度层序分析的基础上,在构造精细解释及沉积古地貌的约束下,利用不同级次层序解释成果,落实关键层位的沉积相带展布特征,形成了一套针对低勘探程度地区区域层序地层格架建立和沉积规律研究的思路和方法。

关键词:低勘探程度地区;频谱属性分析;多尺度匹配对比;层序地层格架;沉积规律

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230009

中图分类号:TE13

文献标志码:A

Sequence Stratigraphic Analysis and Sedimentary Law Research in Low Exploration Area: Take the Jurassic in Wudun Depression as an Example

Yin Wen

Petroleum Institute, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, Xinjiang, China

Abstract: The Wudun depression belongs to an area with a low degree of exploration. The oil source conditions in the Lower Jurassic outcrop area are good, and the oil and gas show well in many wells drilled. However, the sequence stratigraphic framework of the basin, the sequence spatial evolution characteristics and sedimentary distribution rules are not clear, which restricts the later exploration

收稿日期:2023-01-18

作者简介:殷文(1978—),男,教授,博士,主要从事油气储层预测及高精度层序解释方面的研究工作,E-mail: yinwen@cupk.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42004089);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01A141)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42004089) and the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2020D01A141)

deployment, which restricts the next exploration deployment. The research on the sequence stratigraphic division and regional sequence stratigraphic framework of Middle and Lower Jurassic in Wudun depression is carried out by comprehensively applying the data of logging, seismic, core, and analysis data. At first, the spectrum-attribute-trend analysis of logging, time-frequency analysis, geochemical analysis and other methods are used to divide the sequence, and six third-order sequences and 28 fourth-order sequences are divided. Then, the matching wavelet decomposition and reconstruction method is used to improve the resolution of seismic data, and the seismic multi-attribute dimensionality reduction fusion technology and multi-scale matching with well-seismic joint are used for sequence analysis, and then the Jurassic sequence stratigraphic framework is established in this area. At the same time, the logging sequence division results and seismic multi-attribute fusion analysis results are cross-verified to clarify the spatial evolution characteristics of the sequence. At the same time, the logging sequence division results and seismic multi-attribute fusion analysis results are cross-verified to clarify the spatial evolution characteristics of the sequence. On the basis of high-precision sequence analysis, under the constraints of fine structural interpretation and sedimentary palaeogeomorphology, the distribution characteristics of sedimentary facies belts at key horizons are finally determined by using the results of sequence interpretation at different levels. A set of ideas and methods for the establishment of regional high-precision sequence stratigraphic framework and the study of sedimentary laws in areas of low exploration degree have been formed.

Key words: low exploration area; spectrum attribute analysis; multi-scale matching comparison; sequence stratigraphic framework; sedimentary law

0 引言

在低勘探程度地区开展油气勘探工作普遍面临地质认识不足、钻测井资料有限、地震资料品质较差等问题。针对低勘探程度地区,前人^[1-3]综合考虑区域构造、断裂发育、地层沉积特征等因素,利用地质、地球物理资料开展油气资源的勘探和评价。刘震等^[1]以层序地层格架分析法和地球物理预测技术为基础,研究了低勘探程度盆地烃源岩的空间展布和厚度特征;刘春芳等^[2]运用沉积学和构造地质学理论,研究了低勘探程度盆地的地质结构特征和沉积演化特征;曹国银等^[3]探索了低勘探程度地区基于地质认识指导的地震波形和地层切片分析技术,在研究区开展河道砂储层预测。在地质模式指导下,充分利用现有资料,开展地层、沉积特征和地球物理响应的规律性研究,对后续有利目标区勘探、有利储层识别具有重要意义。

五墩凹陷位于敦煌盆地东北部,自2014年XC1井在下侏罗统勘探到油气资源后,五墩凹陷逐渐成为该盆地的重点勘探区域^[4]。下侏罗统露头区出露的大套暗色泥岩及D1井钻遇了厚层页岩,显示该区具备较好的油源条件。同时,五墩凹陷中下侏罗

统广泛发育砂砾岩、砂岩储层,且钻探的D1、D2井也证实了有良好的油气显示,展示出该区域具备较大的勘探潜力。前期工作已对五墩凹陷中下侏罗统开展过一些研究,但由于研究区仅有4口钻井及17条二维地震测线,数据资料有限,只是针对下侏罗统大山口组二段(J_1d^2)与中侏罗统中间沟组一段(J_2z^1)开展了常规层序地层分析,对中下侏罗统层序地层划分工作不足,未能系统建立能够满足该区域油田勘探需要的高精度层序地层格架,导致对沉降特征、储层发育和分布规律认识不清,制约了进一步的勘探部署。因此,本文充分利用测井、地震、岩心、地球化学等资料对五墩凹陷进行研究,以期建立一套针对低勘探程度地区高精度层序地层格架和沉积规律的研究方法,为寻找有利储集体和指导后续勘探部署提供基础。

1 区域地质概况

敦煌盆地基底整体埋深为1 000~3 500 m,主要是元古宇的浅变质岩,盖层则是以侏罗系、新近系为主。五墩凹陷位于敦煌盆地东北部,北为玉门关斜坡,南临三危山隆起,西靠南湖低凸起,东接甜水井凸起(图1),工区面积为2 000 km²^[5-6]。该凹陷为中生代断陷盆地,钻井揭露最老地层为震旦系。

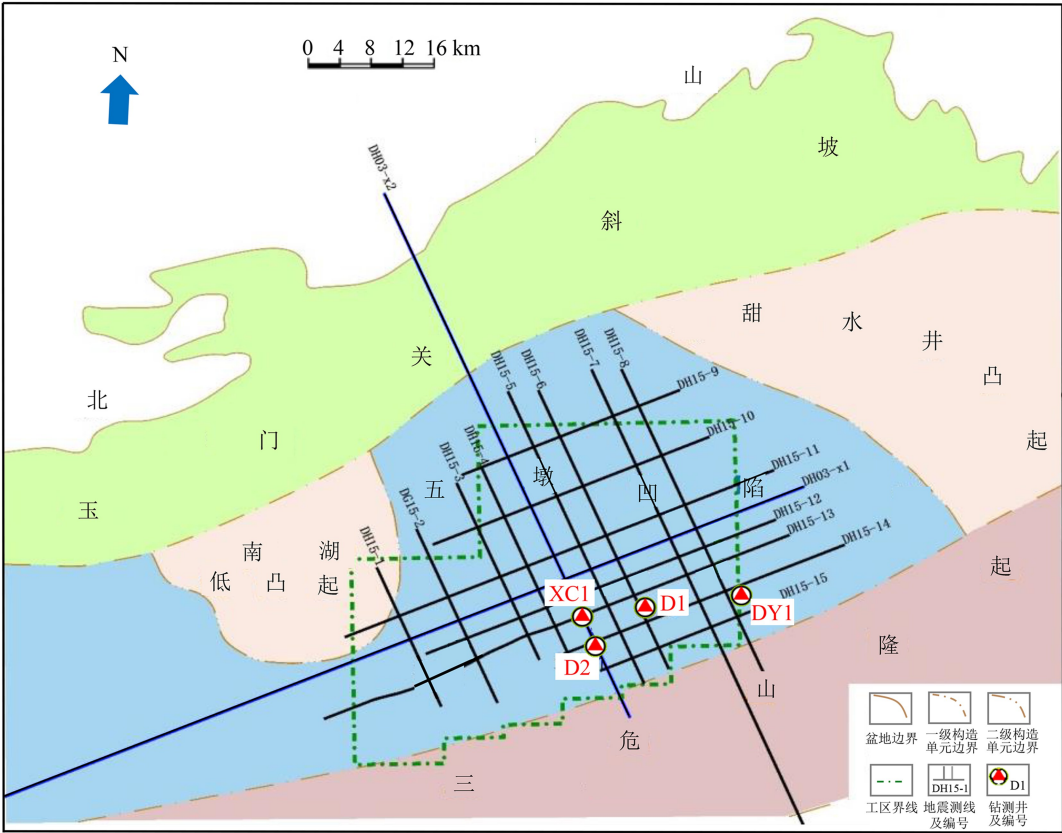


图 1 敦煌盆地五墩凹陷勘探形势图

Fig.1 Exploration situation map of Wudun depression in Dunhuang basin

侏罗系是构成五墩凹陷沉积地层的主体。研究区中下侏罗统包括下侏罗统大山口组(J_1d)、中侏罗统中间沟组(J_2x)、中侏罗统新河组(J_2x)，其中，中侏罗统中间沟组是五墩凹陷的主力含油层段^[7](图 2)。

下侏罗统大山口组与下伏震旦系呈不整合接触，厚度范围分布不均，平均厚度约为 150 m，岩性主要是灰色砂砾岩。中间沟组一段为五墩凹陷主要生油层段，平均厚度为 150 m，岩性可分上下两个亚段，下亚段为灰色砂砾岩及砂岩，砂岩颜色由浅逐渐变深，分选中等，次棱角状，矿物主要是石英，长石次之，局部发育泥岩，灰色—灰黑色，质纯，较硬；上亚段主要是灰色泥岩。中侏罗统中间沟组二段平均厚度为 300 m，岩性主要是深紫色泥岩及砂质泥岩，顶部可见紫红色泥岩，含少量砂质，较硬。中侏罗统中间沟组三段平均厚度为 300 m，岩性主要是由棕红色逐渐变为紫红色砂岩，分选中等，次棱角状，矿物主要是石英，长石次之，而其中发育的泥岩则亦由棕红色逐渐变成深紫色，含少量砂质，较硬，局部可见

深紫色砂质泥岩与泥岩互层发育^[6]。中侏罗统新河组平均厚度为 290 m，岩性主要是棕红色砂砾岩，含棕红色泥质砂岩、泥岩，砂岩以中砂岩为主。

2 高精度层序地层划分

湖平面升降周期中形成的湖退—湖侵旋回地层是层序划分的重要依据^[8]，如高位体系域(HST)表现为反旋回沉积序列，湖侵体系域(TST)表现为正旋回沉积序列。在陆相高精度层序地层学的研究中，测井资料在纵向上具有极高的分辨率，可对不同级别层序、界面特征、沉积旋回性等进行高精度、连续定量的分析。通常在敏感测井曲线(如自然伽马(GR))上 HST 表现为漏斗形，TST 表现为钟形。然而，测井信号属于非平稳信号，存在噪声等干扰信号的影响。因此，测井曲线实则由许多不规则的复杂合成波组成，这就势必会影响高精度层序的识别效果。

最大熵频谱分析(MESA)方法是按信息熵最大准则外推得到自相关函数的方法，特别适用于噪声

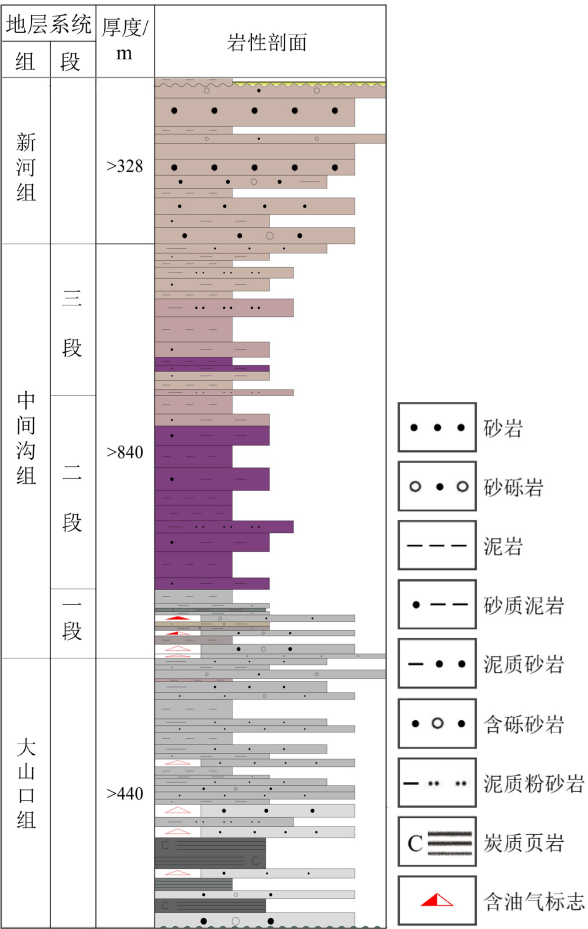


图 2 五墩凹陷中下侏罗统地层充填特征

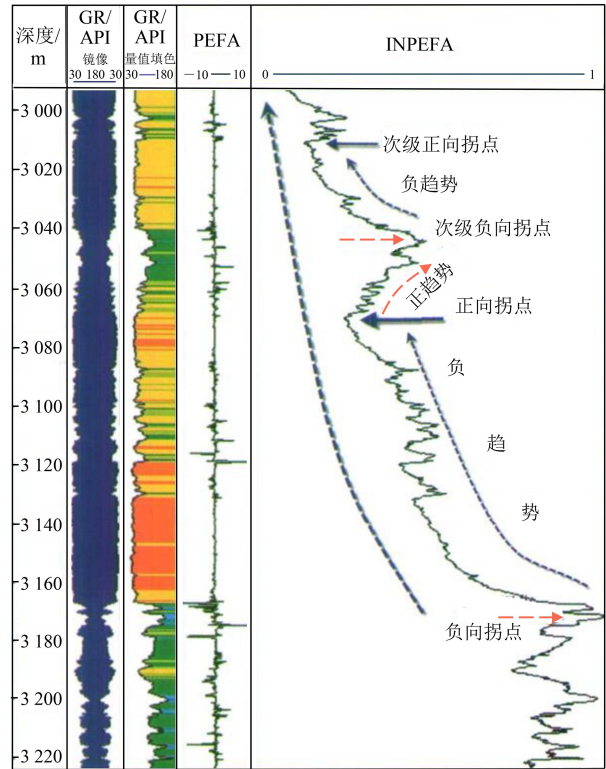
Fig.2 Filling characteristics of Middle-Lower Jurassic strata in Wudun depression

多、信号规则性差的情况^[9]。该方法的实质是对测井曲线复合波信号的分解,可从测井曲线中表征地层间断和岩相变化。基于旋回地层学和层序地层学理论,在最大熵分析方法的基础上进行频谱变化属性分析,实现对层序界面和沉积旋回特征的识别,准确划分层序级次,识别不同级别层序(体系域)界面、层序内部的旋回特征,进而建立高精度层序地层格架。

2.1 预测误差滤波分析

预测误差滤波分析(PEFA)是在 MESA 的基础上,对测井曲线每一深度点对应的测井值计算最大熵分析预测值,再计算同一深度点测井曲线真实值与预测值的差(误差=实际数据-滤波数据),以此得到一条沿垂向变化的锯齿状曲线。通常情况下,PEFA 曲线的突出负误差值(负向尖峰)代表湖泛

面,而突出正误差值(正向尖峰)代表层序界面,不同大小的误差尖峰代表不同级别的等时界面(图 3)。



INPEFA. 综合预测误差滤波分析。

图 3 PEFA 与 INPEFA 曲线特征及意义

Fig.3 Characteristics and significance of PEFA and INPEFA curves

2.2 综合预测误差滤波分析

将 PEFA 曲线采用特定的积分处理,能够得到一条凸显趋势和模式的曲线,即 INPEFA 曲线,其关键就在于曲线本身的趋势和趋势之间的拐点。通常情况下,INPEFA 曲线数值从左向右变大、曲线形态从左向右上升,表示当时的气候环境为逐渐湿润的水进过程;而当曲线数值从右向左变小、曲线形态从右向左降低,表示当时的气候逐渐变得干旱的水退过程。拐点指示了一个层序界面或层序界面内的湖泛面(图 3),其中正向拐点(曲线形态由低变高,对应 PEFA 曲线的正向尖峰)表示层序界面,负向拐点(曲线形态由高变低,对应 PEFA 曲线的负向尖峰)表示湖泛面。由此,INPEFA 曲线其实呈现的是地层的旋回形态,当目的层层序发育完整时,能看到突出的曲线旋回特征^[10]。

2.3 瞬时相位余弦分析

瞬时相位余弦(INCOSIN)应用 Hilbert 变换计算信号,从这些变换产生的复合信号中获得各种属性,以此获得多类地质意义。INCOSIN 趋势变化代表了准层序组的模式,可以清楚看到并区分出进积式准层序组和退积式准层序组。一般而言,一个完全正的趋势,曲线数值由从下往上增大的过程代表了进积式准层序组,曲线数值从下往上减小的过程代表了退积式准层序组(图 4)。

2.4 单井频谱属性分析

INPEFA 和 PEFA 曲线的相互配合使用能够有效反映沉积周期的气候变化以及识别层序界面。在具体应用过程中,PEFA 曲线可以对全井段使用,但在使用 INPEFA 曲线的时候,要注意从全局到分段的变化。另外,测井资料在采集过程中难免会受到各种噪声的干扰,且受环境影响,测井曲线数据幅值变化较大。因此,先对处理井段数据进行中值滤波,保留测井数据中的边缘信息,以达到降噪和易于划分层序界面的目的。

在测井层序划分中,自然伽马、自然电位和视电阻率为较敏感的测井曲线。以 GR 曲线为例,对研究区已有井的 GR 曲线分别计算频谱属性值(图 5)。通过图 4 和图 5 分析发现,当 PEFA 曲线负向尖峰、INPEFA 曲线负向拐点、INCOSIN 属性正趋势时,对应的是湖泛面;当 PEFA 曲线正向尖峰、

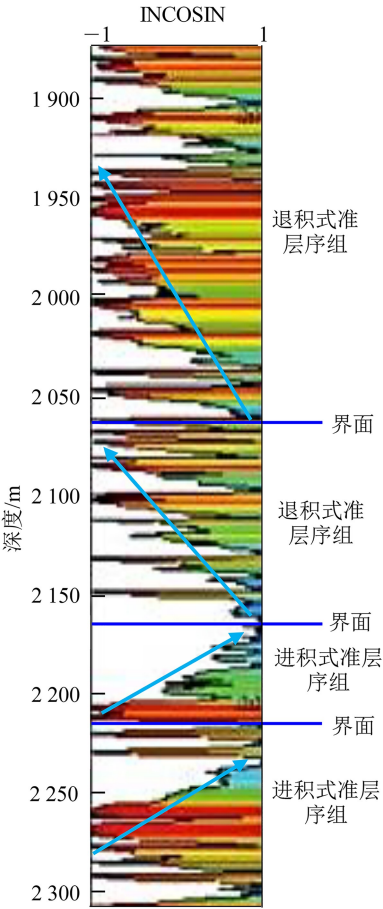
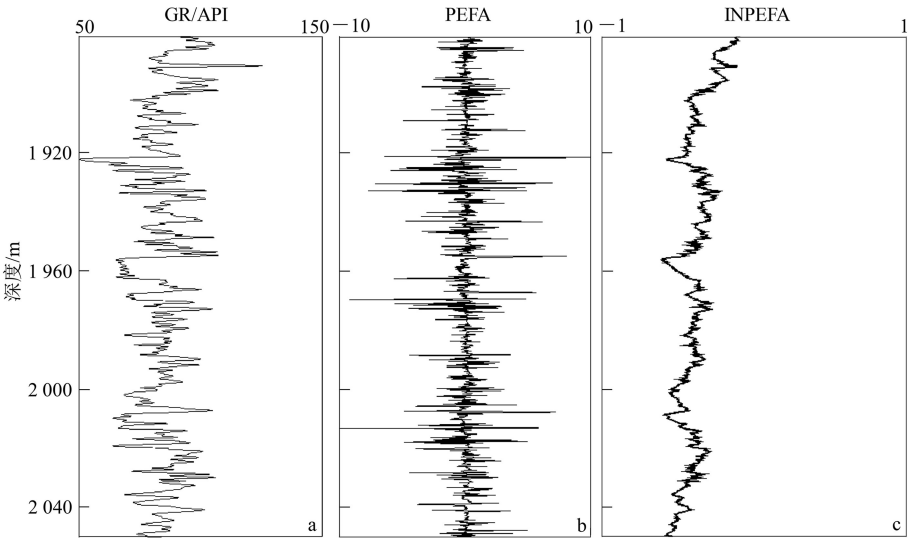


图 4 INCOSIN 曲线趋势模式分析
Fig.4 Trend pattern analysis of INCOSIN



a. GR 曲线; b. PEFA 曲线; c. INPEFA 曲线。

图 5 D1 井中间沟组一段 GR 和计算的频谱属性曲线

Fig.5 GR and calculated spectral property curve with the First Member of Zhongjiangou Formation in Well D1

INPEFA 曲线正向拐点、INCOSIN 属性负趋势对应的是层序界面。由图 5 可以看出,D1 井 1 956~1 963 m 段 INPEFA 曲线呈现漏斗形,INPEFA 曲线的负向拐点对应 PEFA 曲线的负向尖峰,指示了湖泛面。同时,计算原始测井曲线的 INCOSIN 值,对比分析多种频谱属性分析结果,实现对层序界面和沉积旋回特征的识别,进而划分出层序级次,识别不同级别层序(体系域)界面以及层序内部旋回特征。

2.5 地球化学分析

最大湖泛面是 HST 和 TST 的分界面,泥质含量较高。三级层序的边界以及体系域与总有机碳(TOC)发育的旋回性变化具有一定的规律性,将层序地层学与有机地球化学相结合,利用 TOC 质量分数可以进行层序划分。

在一个垂向层序单元内,最大湖泛面往往与最大 $w(\text{TOC})$ 有关。在最大湖泛面之上,由于 HST 的进积作用,陆源碎屑物供给增加, $w(\text{TOC})$ 降低;在最大湖泛面之下,由于 TST 的细粒沉积物较丰富,向最大湖泛面方向 $w(\text{TOC})$ 逐渐增加,有机质类型也随之变好。也就是说,每个三级层序都是一个湖水不断加深(末期加速降低)的过程,因此 $w(\text{TOC})$ 在三级层序内部自下而上会出现一个逐渐增高的趋势。由此,根据 $w(\text{TOC})$ 在垂向上的变化可以划分 4 个三级层序,自下而上依次是 SQ1—SQ4(图 6)。

3 层序地层综合分析

3.1 地震子波分解与重构

地震子波在传播的过程中会受到噪声干扰,震源激发的地震子波在向深层传播过程中高频信号衰减较严重。所得到的地震反射波是不同主频子波相互间叠加的结果^[11]。不同主频子波的叠加结果不一定能够完全反映目的层的地质特征;但在所有子波集合中,存在一部分子波能够有效反映目的层特征。

地震子波分解是把地震道分解成不同频率、不同相位、不同振幅子波的集合(图 7a)。地震子波重构是根据解释目标,选择最能体现该目标分布和变化的子波,且保持重新组合的子波较分解前的位置不变,从而合成新的地震道(图 7b),最终新合成的地震道集将最大限度地反映目标的变化^[11-12]。由

于研究区钻井资料较少,首先选择重构子波,使其符合已有的井;然后,结合以地震资料为基础的地质综合分析资料,对工区的地震响应特征、储层分布特征建立初步的轮廓;最后,优选重构参数,当结果能够满足建立的初步形态时,可以认为是最终的参数。

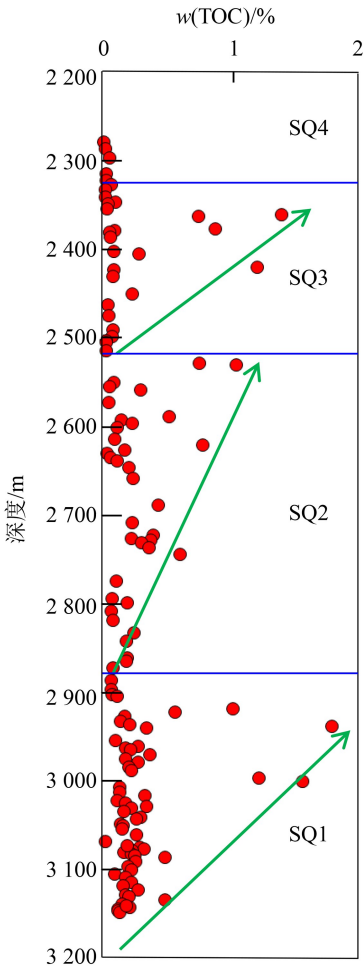


图 6 D2 井 $w(\text{TOC})$ 随深度变化图
Fig.6 $w(\text{TOC})$ variation map of Well D2 with depth

五墩凹陷现有地震资料为二维地震资料,17 条测线共计 715 km,地震资料信噪比较低,有效频带较窄,振幅谱分析得到大山口组的频带分布范围是 10~38 Hz。对五墩凹陷开展地震层序解释前,先进行地震子波分解和重构处理。图 8 展示了原始地震剖面(变面积显示)与处理后地震剖面(变密度显示)的对比效果。可以看出,处理后的地震资料分辨率得到了有效的提高,有利于后续地震层序的识别与划分。

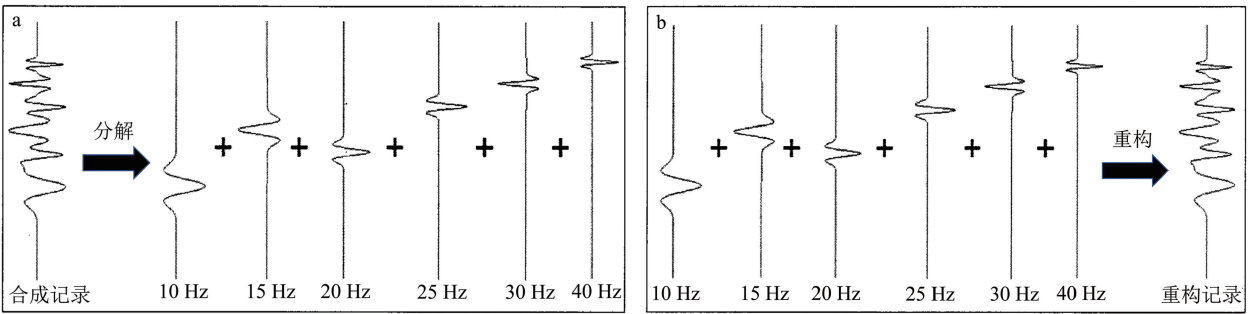
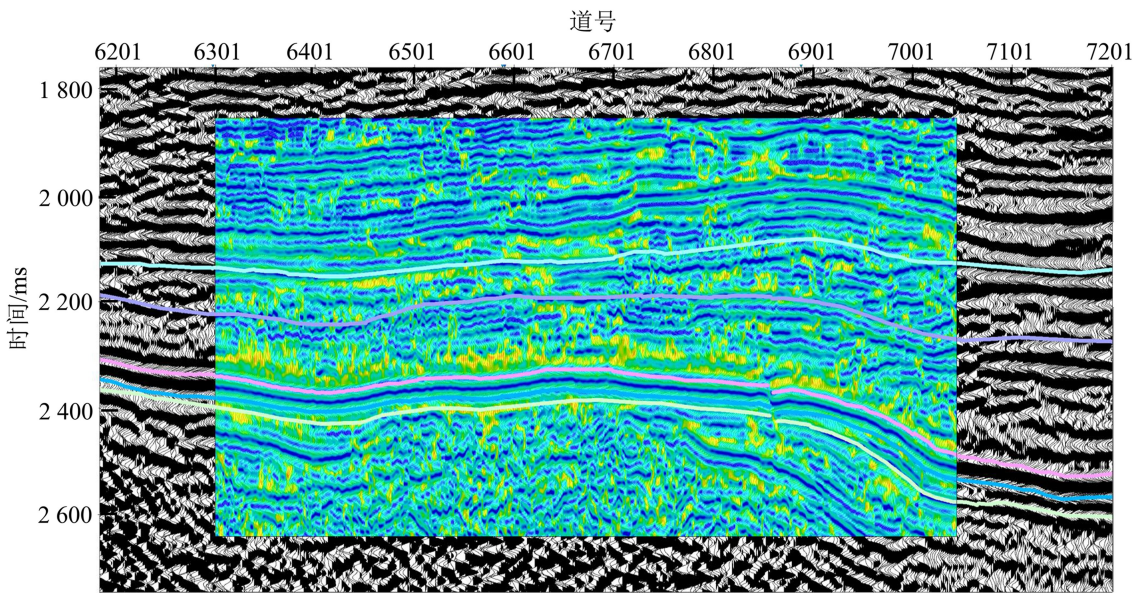


图 7 地震子波分解(a)与重构(b)示意图
Fig.7 Diagram of seismic wavelet decomposition (a) and reconstruction (b)



不同颜色分层表示解释后的不同地震层位。
图 8 原始地震剖面(变面积显示,黑白)与处理后地震剖面(变密度显示,彩色)的对比

Fig.8 Comparison between original seismic profile (variable area display, black-white) and processed seismic profile (variable density display, color)

3.2 多尺度层序综合分析

3.2.1 地震多属性融合分析

地震属性分析有利于刻画沉积层序内部结构,能够较好地展示储集层内隐藏的岩性、物性等信息,挖掘地震资料横向识别的潜力,有利于层序地层划分及砂体横向展布刻画。不同属性针对不同地区,不同储集层敏感性、有效性存在差异。常规地震属性解释通常采用单一属性或多属性相互印证的方法,存在局限性和多解性,无法全面反映地质体的特征^[13]。多属性融合技术能表征不同地层、储层特征的多个属性,将数学计算和显示方法相融合,能够同

时反映多个属性对研究层段的影响^[14-15]。因此,采用多属性融合解释技术能够展现更加丰富的地质信息,提高地震解释精度。

针对全工区测线中间沟组一段提取层间属性,并计算各大类不同小类的层间属性相关系数,甄选互补相关的属性,将这些互补相关属性进行层间属性比例融合。在甄选参与层间属性融合分析的过程中,应注意选择相关系数低的属性,以免影响最终预测目标的精度和稳定性。

经过分析,确定选择 3 类 8 种属性开展多属性融合分析,包括时窗及振幅类属性(平均振幅、振幅

斜率、反射强度斜率)、瞬时类属性(INCOSIN、瞬时加速度、薄层指示器、包络二阶导数)、子波类属性(视极性)(表 1)。时窗及振幅类属性具有凸显小区内优势储层、增强断层识别效果、分析岩性储层特征的优势,而反射强度斜率在与其他振幅、频率属性连用时,能较好地地区分岩性、储层特征;瞬时类属性适用于显示不连续的地层信息及层序边界,广泛应用于构造和地层学解释;子波类属性可以检查反射层极性的横向变化^[16],适用于亮点、暗点、平点的确定,提高层序界面的标定质量。

通过岩性统计计算不同岩性的厚度百分比,分别将不同井根据岩性进行分类,建立类别样本。在样本监督下,针对不同目的层,优选与岩性和层序分析对应性好且相关性低的属性(表 1)。采用主成分分析(PCA)法,通过 K-L(Karhunen-Loeve)换算将原始多个地震属性压缩成新的混合属性,能更有利于层序分析。

图 9 展示了地震多属性融合后的效果,过 XC1 井的北北西向 DH03-x2 地震属性剖面表现为较明显向南退积的同相轴反射特征。不难看出,多属性

融合后提高了目的层的分辨率,结合地震反射结构和反射构型特征,能够有效识别目的层段内(中间沟组一段)的超覆和体系域特征。

3.2.2 井震联合层序对比分析

地层的沉积模式、岩相组合特征在地震和测井资料中都表现出沉积旋回性,具有一定的层序对应关系,而时频谱具有分析沉积旋回特征的优势。结合地震、测井和地质资料,采用时频分析方法^[17-18],旨在以地震时频旋回控制宏观层序界面和内部旋回变化,以测井层序旋回控制高精度层序旋回特征。计算测井曲线、井旁道、连井地震道的时频谱,井震联合开展多尺度匹配分析和层序地层划分,进而建立区域层序地层格架。

通过单井层序分析,将五墩凹陷中下侏罗统共划分为 6 个三级层序、28 个四级层序(图 10),奠定了区域层序地层格架建立的基础;然后,采用测井频谱属性趋势分析、井震联合时频谱层序分析、地球化学分析等多信息源、多尺度层序分析,通过测井与地震的相互交叉验证,最终建立该区中下侏罗系区域层序地层格架,实现了井震资料在相同级别研究目

表 1 五墩凹陷 SQ3 样本监督下属性优选结果
Table 1 Attribute optimization results under the supervision of SQ3 samples in Wudun depression

分类	属性类别		
	时窗及振幅类	瞬时类	子波类
SQ3-LHST	平均振幅、反射强度斜率	INCOSIN、薄层指示器、包络二阶导数	
SQ3-LEST	反射强度斜率	薄层指示器、INCOSIN	视极性
SQ3-LLST	振幅斜率、平均振幅、反射强度斜率	瞬时加速度、薄层指示器	

注:LHST 为湖泊高位体系域;LEST 为湖泊扩张体系域;LLST 为湖泊低位体系域。

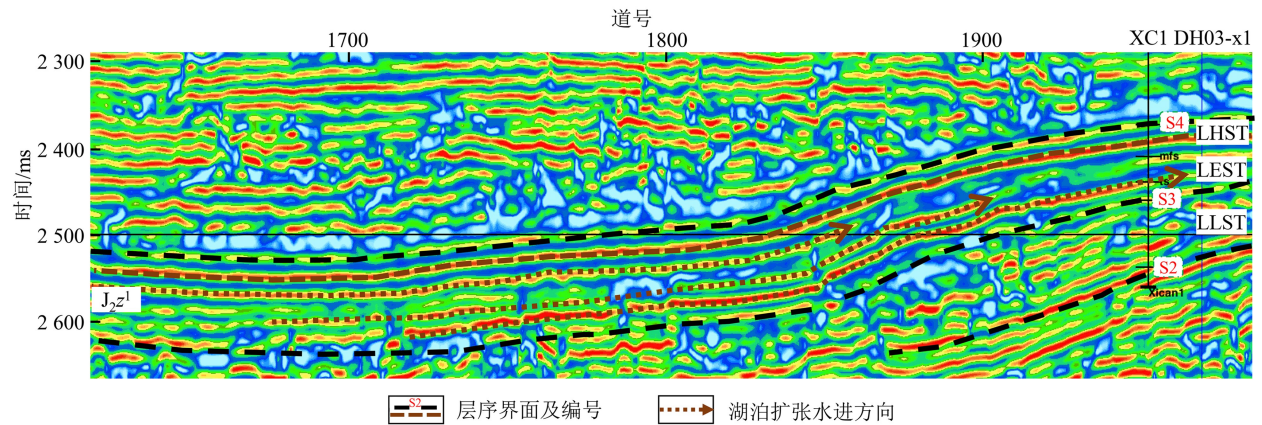
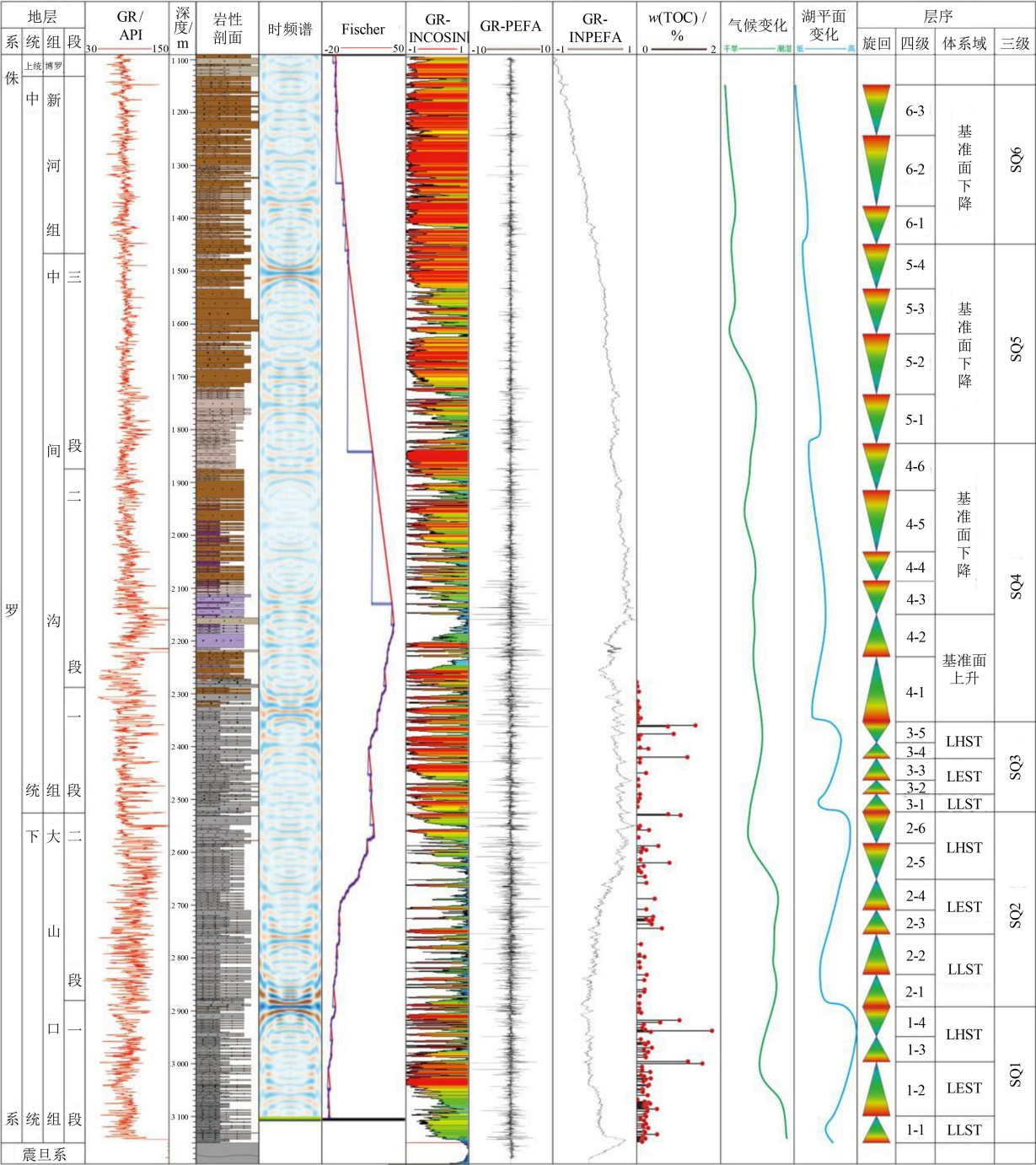


图 9 基于多属性融合方法地震层序解释
Fig.9 Seismic sequence interpretation based on multi-attribute fusion method



岩性剖面图例同图 2。Fisher 判别方法是处理概率分布未知分类问题的一种重要方法。

图 10 D2 井层序综合分析结果

Fig.10 Comprehensive analysis results of Well D2 sequence

标的综合解释。图 11 展示了测井资料、地震道时频谱等信息的对应关系,明确层序沉积环境、沉积旋回剖面的发育情况及岩性特征,最终厘定五墩凹陷区的高精度层序划分,建立了五墩凹陷中下侏罗统层序地层格架(图 12),明确了层序空间演化特征(图 13)。

1) SQ1—SQ3 为陆相湖盆层序结构特征,湖盆范围较大,发育典型陆相断陷湖盆层序结构样式,沉

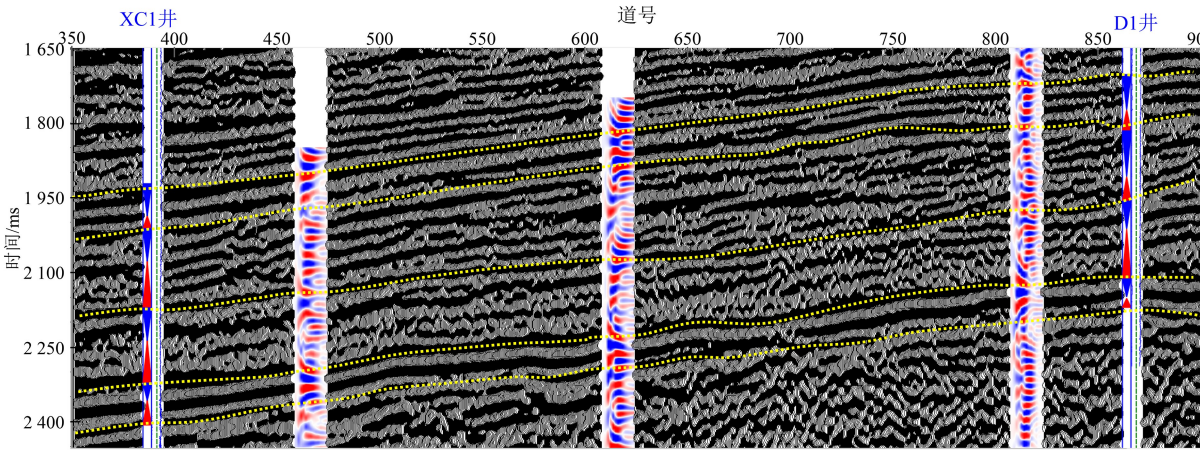


图 11 XC1 井- D1 井井震联合层序地层对比

Fig.11 Sequence stratigraphy comparison with well-seismic combined between Well XC1 and Well D1

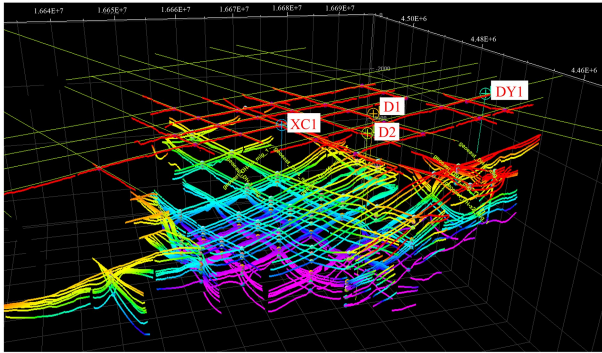


图 12 五墩凹陷层序地层格架

Fig. 12 Sequence stratigraphic framework of Wudun depression

积物供应越来越充足,分为低 LST(低位体系域期)、TST 期和 HST 期。其中,LST 期湖平面震荡上升,主要发育退积式或加积式的扇三角洲沉积;TST 期湖平面快速上升,主要发育退积式的扇三角洲沉积;HST 期湖平面震荡,先升后降,主要发育辫状河三角洲或扇三角洲的垂向加积。

2)SQ4 沉积期湖盆开始萎缩。早期基准面短期上升,发育辫状河三角洲前缘沉积,经历了两个短期的基准面上升旋回,基准面持续下降,湖盆逐渐萎缩,主要发育陆上辫状河流相沉积。

3)SQ5—SQ6 沉积期湖盆快速萎缩,基准面持续下降,尚未在平面上判识此时期湖盆范围,但 3 口井均为陆上辫状河流相沉积,推测湖盆此时已基本消亡。

4 沉积体系展布分析

在单井相与连井相分析的基础上,以侏罗系 SQ3—LHST 为例,在构造精细解释及沉积古地貌约束下(图 14a),利用不同级次层序界面解释成果,采用钻井约束下的地震多属性融合分析技术优化地震属性(图 14b)。针对不同层位,在样本划分基础上选取不同的敏感地震属性,针对选取的多敏感属性进行降维压缩与主成分分析,得到最终能够反映岩性的属性参数,最终落实关键层位的沉积体系展布特征(图 14c)。文中以中间沟组一段 SQ3—HST 为例进行分析。

- 1)SQ3—LLST(相当于中间沟组一段一砂组)沉积体系展布
- SQ3—LLST 发育时期,由于在湖盆快速萎缩后经历了一个短时期的沉积间断,湖盆范围小,但是沉积体系展布继承了 SQ2 沉积时期的格局,只是由于沉积物供给通量与可容纳空间均较少,发育的辫状河三角洲与扇三角洲范围均较小。
- 2)SQ3—LEST(相当于中间沟组一段二砂组)沉积体系展布
- SQ3—LEST 发育时期湖平面快速上升,湖盆范围快速扩大,可容纳空间快速增加,虽然沉积砂体随着湖平面的快速上升逐渐向岸退积,但是整体湖盆沉积物范围扩大。
- 北部北山物源区提供的沉积物主要沿 D1 井古沟谷向南搬运,推进至 D1 井区,D1 井主要位于辫状河三角洲前缘亚相至前辫状河三角洲亚相过渡区

域,发育灰色泥岩与薄层中细砂岩互层沉积物。由南部进入湖盆的扇三角洲主要沿 D2 井西古沟谷向北搬运沉积物,控制了 D2 井区和 XC1 井区的广大区域,同时湖盆西部也受到由南部进入湖盆的三危山扇三角洲沉积体系的控制。D2 井主要为扇三角洲前缘亚相,发育厚层的砂砾岩、含砾砂岩夹薄层灰色泥岩沉积物;XC1 井相比 D2 井,由于位于扇三角洲前缘亚相与前扇三角洲亚相的过渡区域,因此表现出砂岩百分含量降低的特征,下部为厚层砂砾岩、含砾砂岩、中粗砂岩组合加薄层灰色泥岩,向上泥岩厚度逐渐增大,砂岩厚度逐渐减薄,粒度逐渐变细。

3)SQ3 - LHST(相当于中间沟组一段三砂组)沉积体系展布

SQ3 - LHST 发育时期上升速率明显降低,可容纳空间增加速率降低,沉积体系展布与 LEST 具有继承性,D1 井仍位于北部北山物源区供源形成的辫状河三角洲前缘亚相与前辫状河三角洲亚相的过渡区域,XC1 井区位于两支物源之间的浅湖区域。

此时期,由于最大湖泛面的形成,广泛发育缓慢沉积段(CS 段),分布于前辫状河三角洲亚相、前扇三角洲亚相及浅湖亚相等沉积区域,CS 段由于有机质富集,具备形成有利烃源岩的条件。

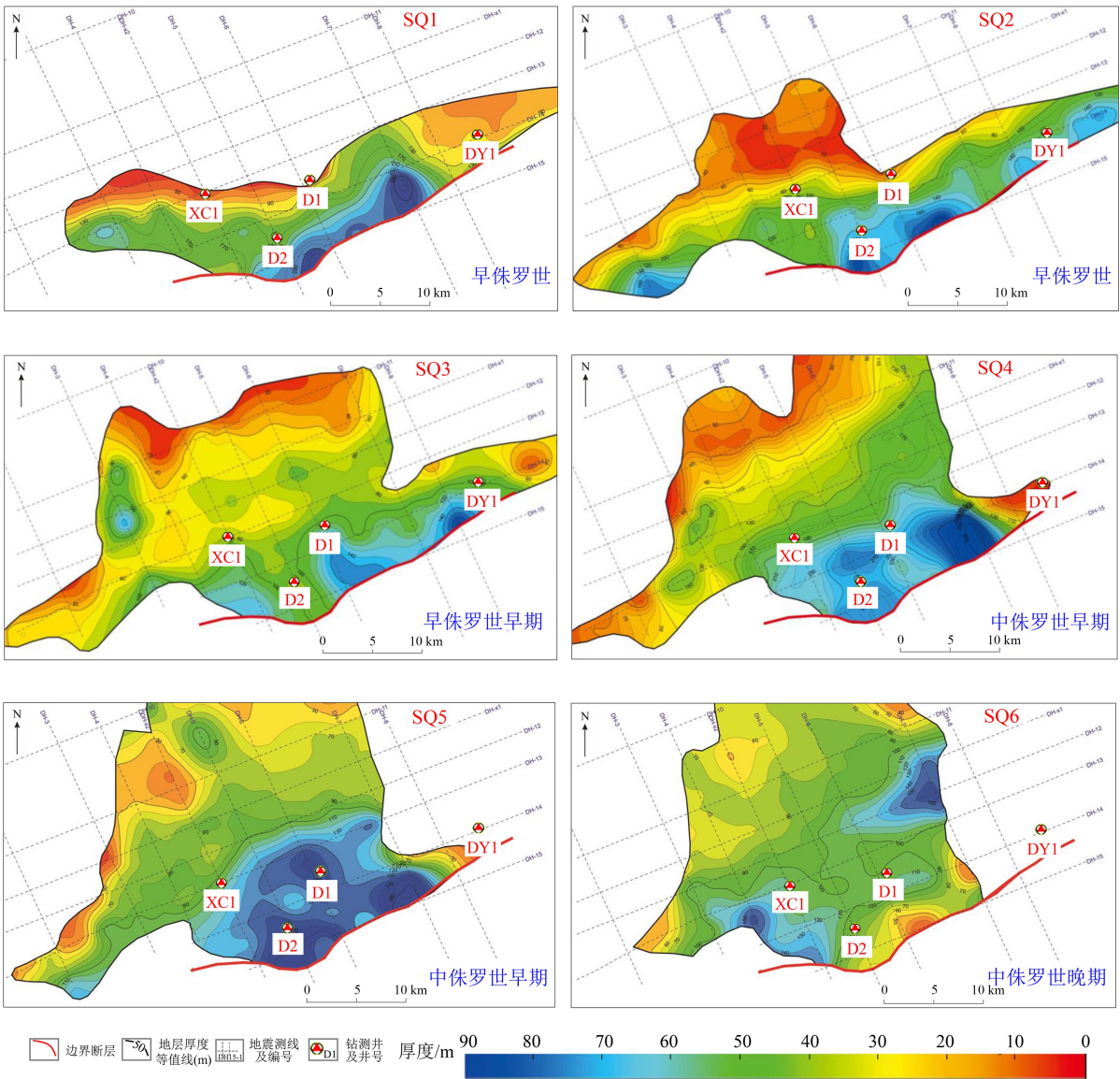


图 13 五墩凹陷中下侏罗统层序空间演化特征

Fig.13 Spatial evolution characteristics of Middle-Lower Jurassic sequence in Wudun depression

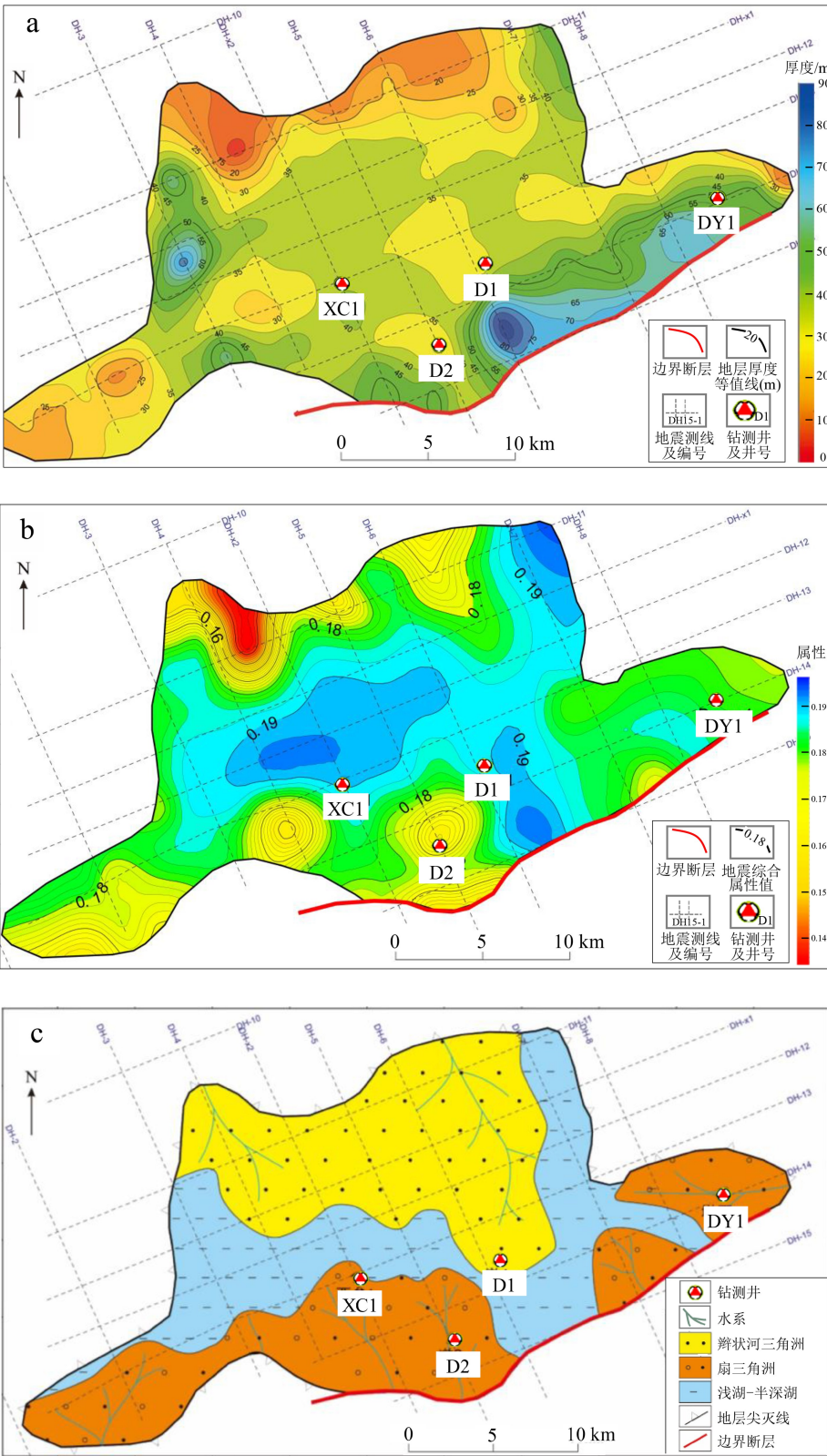


图 14 侏罗系 SQ3-LHST 综合图

Fig.14 Comprehensive diagram of Jurassic SQ3-LHST formation

5 结论

1)综合利用测井频谱属性趋势分析技术、时频分析技术和地球化学分析技术,将五墩凹陷中下侏罗统划分为 6 个三级层序,其中 SQ1—SQ3 为陆相断陷湖盆层序结构样式,SQ4—SQ6 为陆相高分辨层序结构样式;结合匹配子波分解重构技术对二维地震资料进行解释性处理,并采用多属性融合技术和井震联合对比方法开展层序分析,建立了区域层序地层格架。

2)结合测井相、地震相及岩石学分析识别出浅湖与半深湖、辫状河三角洲前缘、扇三角洲前缘和河流相等沉积相类型。SQ1—SQ3 发育时期湖盆范围较大,从 SQ1 的半深湖逐渐演化到 SQ3 的浅湖沉积背景,沉积物供应越来越充足,发育扇三角洲与辫状河三角洲沉积;至 SQ4 发育时期,经历两个短期的基准面升降旋回后,基准面持续下降,湖盆逐渐萎缩,主要发育陆上河流相沉积;SQ5—SQ6 发育时期湖盆快速萎缩,基准面持续下降,主要发育陆上河流相沉积。

参考文献(References):

[1] 刘震,常迈,赵阳,等.低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究[J].地学前缘,2007,14(4):159-167.
Liu Zhen, Chang Mai, Zhao Yang, et al. Method of Early Prediction on Source Rocks in Basins with Low Exploration Activity [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4):159-167.

[2] 刘春芳,肖坤叶,徐虹,等.海外低勘探程度地区勘探技术与应用[J].石油地球物理勘探,2006,41:62-65.
Liu Chunfang, Xiao Kunye, Xu Hong, et al. Techniques and Application of Overseas Exploration in Areas of Lower Exploratory Degree [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41:62-65.

[3] 曹国银,邵东然,张桂芳,等.低勘探程度区井位部署的河道砂储层预测技术:以松辽盆地外围 SC 地区登娄库组为例[C]//中国石油学会 2019 年物探技术研讨会.成都:中石油西南油气田公司,2019:631-634.
Cao Guoyin, Shao Dongran, Zhang Guifang, et al. Prediction Technology for River Sand Reservoirs Deployed at Well Locations in Low Exploration Areas: Taking the Denglouku Formation in the Peripheral SC Area of the Songliao Basin as an Example [C]// 2019 Geophysical Exploration Technology Seminar of China

Petroleum Society. Chengdu: PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2019:631-634.

[4] 张敏,曹力伟.五墩凹陷中—下侏罗统物源体系及沉积演化特征[J].长江大学学报(自然科学版),2017,14(19):8-12.
Zhang Min, Cao Liwei. The Characteristics of Lower Jurassic Source System and Its Sedimentary Evolution in Wudun Sag [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(19):8-12.

[5] 蔡利飘.敦煌盆地五墩凹陷中新世代构造演化及其油气地质意义[J].石油地质与工程,2017,31(5):1-4.
Cai Lipiao. Meso-Cenozoic Tectonic Evolution and Significance in Petroleum Geology of Wudun Sag in Dunhuang Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(5):1-4.

[6] 韦敏鹏.敦煌盆地五墩凹陷侏罗系沉积体系及分布规律[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
Wei Minpeng. The Sedimentary System and Distribution of Jurassic in Wudun Sag of Dunhuang Basin [D]. Beijing: China University Petroleum (Beijing), 2017.

[7] 赵文扬.敦煌盆地侏罗系沉积特征及油气远景评价[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
Zhao Wenyang. Sedimentary Characteristics and Hydrocarbon Prospect Evaluation of Jurassic in the Dunhuang Basin [D]. Beijing: China University Petroleum(Beijing), 2017.

[8] Boulila S, Laskar J, Haq B U, et al. Long-Term Cyclicities in Phanerozoic Sea-Level Sedimentary Record and Their Potential Drivers [J]. Global & Planetary Change, 2018, 165: 128-136.

[9] 张红贞.测井频谱分析技术在碎屑岩层序地层分析中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.
Zhang Hongzhen. The Research of Applications of Spectral Analysis Technique of Wireline Logs in the Siliciclastic Sequence Stratigraphy Analyse [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

[10] 王鑫.东营北带深层砂砾岩测井层序对比与岩性识别研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
Wang Xin. Logging Sequence Comparison and Lithologic Identification Study on Deep Sandy-Conglomerate of Dongying Northern Zone [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

[11] 邱娜.地震子波分解与重构技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
Qiu Na. Research on Seismic Wavelet Decomposition

and Reconstruction Technology[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

[12] 张繁昌, 刘汉卿, 张立强, 等. 复数道动态匹配追踪算法的改进[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 183 - 189.

Zhang Fanchang, Liu Hanqing, Zhang Liqiang, et al. Improved Complex-Trace Dynamic Matching Pursuit Algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1):183 - 189.

[13] 彭凡, 杜文凤, 刘洪栓. 基于地震多属性融合技术的煤层巷道识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 235 - 241.

Peng Fan, Du Wenfeng, Liu Hongshuan. Coal Seam Roadway Identification Method Based on Seismic Multi-Attribute Fusion Technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6):235 - 241.

[14] 韩飞鹏, 宋光建, 吴振坤, 等. 致密油“甜点”多属性融合预测技术[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1):94 - 99.

Han Feipeng, Song Guangjian, Wu Zhenkun, et al. Multi-Attribute Fusion Prediction Technique for Tight Oil ‘Sweets’ [J]. Special Oil and Gas Reservion, 2019, 26(1):94 - 99.

[15] 刘依谋, 印兴耀, 张三元, 等. 宽方位地震勘探技术新进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3):596 - 610.

Liu Yimou, Yin Xingyao, Zhang Sanyuan, et al. Recent Advances in Wide-Azimuth Seismic Exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3):596 - 610.

[16] 倪凤田. 基于地震属性分析的储层预测方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2008.

Ni Fengtian. Reservoir Parameter Predicted Method Research Based on Seismic Attribute Analysis[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.

[17] 曹文杰. 黔西织纳地区晚二叠世煤系高频层序地层特征及其对泥页岩发育影响[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.

Cao Wenjie. Characteristics of High-Frequency Sequence Stratigraphy of the Late Permian Coal in the Zhina Area of Western Guizhou and Its Influence on the Development of Mud Shale[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[18] 杨勇强, 邱隆伟, 陈世悦, 等. 基于小波能量谱系图及小波曲线的层序地层划分[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 783 - 789.

Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Chen Shiyue, et al. Sequence Stratigraphy Idengtification Based on Wavelet Energy Spectrum and Wavelet Curve[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 783 - 789.