

断陷湖盆中深层砂体地震沉积学研究 ——以南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段为例

穆晓亮¹, 常少英^{2,3}, 牛花朋³, 刘玲利², 王孟修²

1 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油大学(北京)

摘要 南堡凹陷老爷庙地区断坡控砂型的中深层储集体存在埋藏深、有效地震信号弱,砂体横向变化快、砂体形态刻画不清等问题,制约了高效井部署和剩余油挖潜。基于岩心、测井、地震等资料的分析,探索出了以能量半衰时地层结构识别、最小成本函数法层序地层追踪以及相对泊松比识别岩性等3种方法为主的“三域三要素”地震沉积解释方法。结果表明:①研究区东营组三段上亚段沉积体纵向上具有“下砾上砂”的沉积特征:下部发育近岸水下扇沉积,上部发育辫状河三角洲沉积。②东三段上亚段以老爷庙走滑断裂转换带为界,庙北河间滩较发育,呈“砂岛式”沉积;庙南发育近岸水下扇沉积体系,沉积早期至沉积晚期扇体规模先扩大后缩小,形态由裙边状逐渐演化为狭长条带状水下分流河道沉积,扇体靠近油源断裂,是油气勘探开发的接替区。③“三域三要素”地震沉积储层表征方法,对于复杂构造区沉积微相表征、有利储层分布预测具有较好的适用性,砂体厚度预测符合率达到90%。

关键词 地震沉积学; 三域三要素; 断陷湖盆; 东营组; 南堡凹陷

中图分类号:TE121.3 **文献标识码**:A

引用:穆晓亮,常少英,牛花朋,等.断陷湖盆中深层砂体地震沉积学研究:以南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段为例[J].海相油气地质,2024,29(3):327-336.

MU Xiaoliang, CHANG Shaoying, NIU Huapeng, et al. Study on seismic sedimentology of middle-deep sand bodies in faulted lacustrine basin: taking the upper third member of Dongying Formation in Laoyemiao area of Nanpu Sag as an example[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(3): 327-336.

0 前言

随着中、浅层油气田勘探和开发程度的不断提高,勘探难度愈来愈大,为了满足全国乃至全球能源日益增长的需求,中深层已成为当前油气勘探开发的重要领域^[1]。断陷湖盆作为世界上重要的含油气盆地类型之一,中深层砂体是该类盆地油气资源的重要储集场所,具有储层类型多样的特征^[2]。因此,开展断陷湖盆的中深层砂体的分布预测研究能够有效助推我国东部陆上及滨海中新代断陷盆地油气勘探。截至目前,断陷湖盆许多领域的油气勘探开发已经取得了显著成绩,如渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组^[3]、海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部等领域^[4-5]。断陷湖盆中深层下一步的油气勘探主要存在以下几个问题:①地层埋藏较深。中深层

地震资料受大地滤波作用影响,地震能量极大衰减,地震分辨率降低。②砂体横向变化快。受地质构造和沉积环境等条件影响,砂体形态、大小、分布和成因参数变化较快,储层发育控制因素和分布规律复杂,致使砂体边界及砂体间的连通性认识不清。③砂体刻画不清。砂体结构、边界等刻画不清导致储层预测精度降低,进而制约该类储集体的高效勘探和开发。

长期以来,地震沉积学在识别和刻画断陷湖盆多种成因砂体等方面取得了较好的应用效果^[6-9]。然而经典地震沉积学技术方法也存在着一些不足,如:地层切片技术适用于沉积厚度与沉积速率呈正比的沉积场景,而在复杂构造区,特别是在小规模断坡带沉积往往不符合沉积速率和沉积厚度成正比的条件下,应用效果较差;-90°相位转换技术

收稿日期:2024-01-26;改回日期:2024-06-07

本文受中国石油基础性前瞻性重大科技专项“南堡凹陷老爷庙中深层地震资料精细成像处理与储层预测攻关”(项目编号:物探攻关2021-02)资助

第一作者:穆晓亮,中国地震局地质研究所在读博士,主要从事地质地球物理研究。通信地址:100029北京市朝阳区华严里甲1号;E-mail:muxiaoliang1210@163.com

通信作者:常少英,博士,高级工程师,主要从事地质地球物理综合研究。通信地址:310023浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail:csy991@163.com

能改善地震振幅与岩性间的关系,通过地震振幅来表征岩性的变化,但中深层断坡埋藏较深,砂泥阻抗差较小,−90°相位转换后的振幅区分砂泥岩效果不明显。

基于断陷湖盆的中深层砂体薄、横向变化快、非均质性强等地质特征,为了解决经典地震沉积学在复杂构造区存在的应用难题,需要改善以往地震沉积学分析方法。以南堡凹陷老爷庙地区岩心、测井、地震等资料为依托,本次研究形成了能量半衰时识别砂体结构、基于最小成本函数法的 Wheeler 域变换识别砂体界面和相对泊松比识别岩性的“三域三要素”地震沉积解释组合技术思路,有效拓展了地震沉积学实际应用方法,实现了对南堡凹陷老爷庙地区东营组东三上亚段沉积特征的刻画,深化了地质认识,取得了良好的应用效果。

1 地质概况

老爷庙地区位于渤海湾盆地黄骅拗陷南堡凹陷的西北部,是受西南庄断层控制的以滚动背斜为主体的二级构造单元(图 1a),构造面积约为 240 km²。南堡凹陷老爷庙地区经历了多期构造运动,在古近纪开始稳定沉降,湖盆范围扩大,湖平面升降变化

控制了沉积体系的演化^[10]。老爷庙构造演化分为裂陷期和裂后沉降期 2 大阶段,东营期主要表现为强烈的沉积断陷活动,以老爷庙走滑断裂转换带为界,形成了庙北滚动背斜和庙南斜坡 2 个构造单元(图 1a)。多期断陷作用形成众多以 NNE、NE 走向为主的断裂和相关构造^[10-11],西南庄断裂活动的多幕性和多旋回性控制了凹陷北部沉积旋回的形成和发展,发育了多种类型的储集砂体^[12]。

研究区中深层自下而上划分为 6 个三级层序(图 1b),地层对应关系为:沙河街组一段对应 SQ1,东三(东营组三段)下亚段对应 SQ2,东三上亚段对应 SQ3,东营组二段对应 SQ4,东营组一段对应 SQ5,馆陶组对应 SQ6。东三段顶界(SB4)、东三上亚段底界(SB3)和东三段底界(SB2)为东三段内的三级层序界面。东营组整体储盖组合良好,成藏条件优越,具有良好的勘探前景^[13]。本文研究目的层为东三上亚段,地层厚度为 160~350 m。根据岩性特征可将东三上亚段分为上、下两部分:上部厚度为 100~210 m,声波速度低,自然伽马较高,岩性以泥质砂岩、中—细砂岩等细碎屑岩为主,为辫状河三角洲沉积;下部砂岩呈块状,声波速度较高、自然伽马低、电阻率高且深浅电阻率重合,岩性以砂砾岩

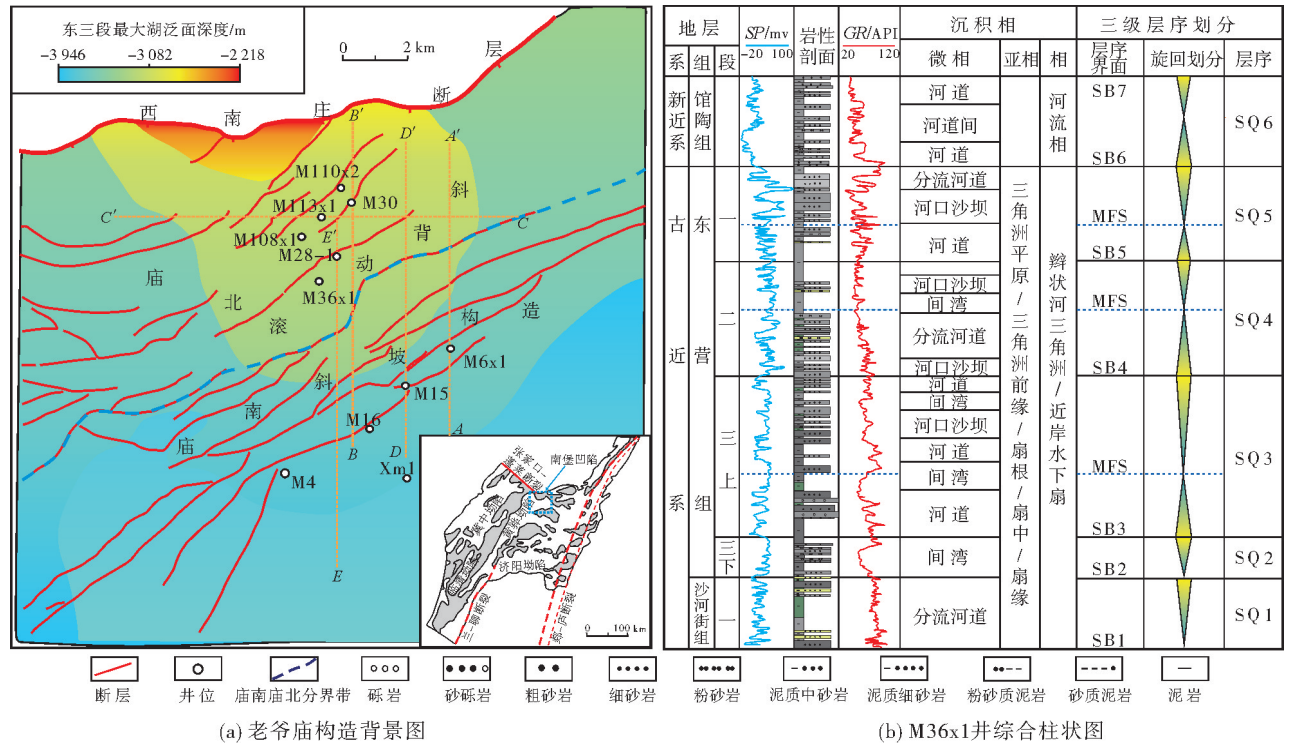


图1 南堡凹陷老爷庙构造背景及M36x1井综合柱状图

Fig.1 Geological background map of Laoyemiao structure and comprehensive column of Well M36x1 in Nanpu Sag

为主,厚度为60~140 m,单砂层组厚度一般小于30 m,为近岸水下扇沉积^[14-18]。

2 技术方法原理

砂体内部结构的刻画有利于储层预测及油藏单元评价。针对断陷湖盆的中深层的地质特点,构建“三域三要素”地震沉积学解释技术,在 Wheeler 域、构造域、相位域内将反射结构、形状、振幅三要素综合起来进行地震沉积解释。

2.1 能量半衰时识别砂体结构

振幅信息是沉积储层预测的重要依据,但地震波在地层中传播时受到散射、地层吸收的影响,中深层能量衰减严重,常规的地震属性方法无法很好地预测砂体结构^[19]。能量半衰时是地震波能量的变化关系^[20-21],对于沉积环境相对平静的环境,反映的地震反射能量变化较小,能量半衰时趋于一个中值;当储层含有油气,反射能量增加并伴有同相轴

下拉,能量半衰时会变大,因此,可作为指示沉积环境、刻画地质体内部结构变化的地震参数,特别是受强反射层影响,反演效果较差的薄互层,能量半衰时属性能够更大程度地分辨弱信号的界面信息,可以有效地识别复杂地层砂体结构。

能量半衰时能够用在给定的分析时窗内,计算地震反射波能量达到1/2时的相对时间位置,分析时窗内振幅的相对变化关系^[20]。时窗大小的选择是能量半衰时识别复杂地层砂体结构的关键^[21]。南堡凹陷老爷庙构造中深层东营组东三上亚段储层具有埋藏深、厚度薄(厚度一般小于30 m)、地震分辨率低的特点,因此在进行能量半衰时属性提取时,选择10 ms的时窗。结果表明,相比原始地震数据,能量半衰时属性能够有效地识别出多期前积结构体。对于老爷庙东三段,前积体反射同相轴呈现向斜坡方向倾斜的形态,整体反射特征振幅较强,连续性较好。相比普通地震剖面,该剖面分辨率更高,对于薄互层的内部结构识别,应用效果良好(图2)。

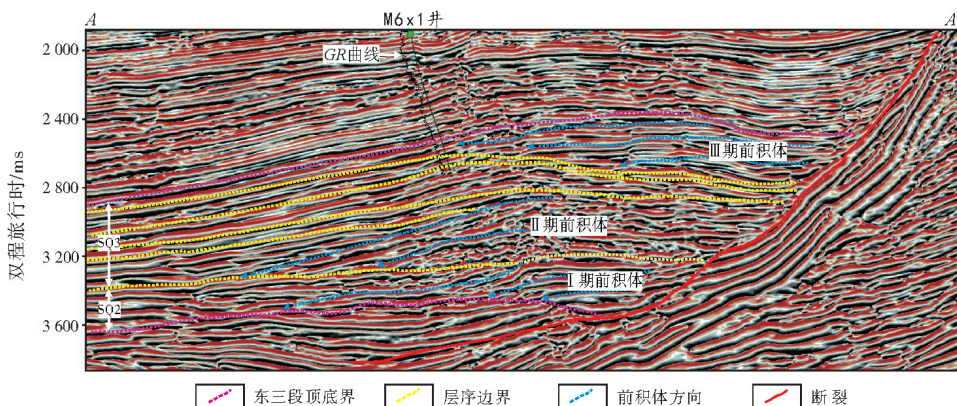


图2 南堡凹陷东营组中深层砂体内部结构相位域内识别

Fig. 2 Seismic section identifying the internal structure of medium-deep sand bodies in phase domain

2.2 基于最小成本函数法的Wheeler域变换

传统的地层切片是采用时间切片或者层位切片,这两种切片方式都能直观有效地反映地层信息^[22]。然而,时间切片对于非水平地层或者由于剥蚀作用导致地层厚度分布不均匀时,所得结果的准确性并不具备参考意义;层位切片只有在沉积速率与沉积厚度成正比时,才能有效地识别出地质体。对于中深层复杂构造背景下的砂体预测,传统地层切片的技术适用性较差。

基于最小成本函数法的Wheeler域变换技术是一种优化算法,是对层位自动追踪、地层切片、

时间切片3种技术的改善和更新,其原理是利用成本函数曲线,在曲线的最低点即最小成本处取点,通过计算数据点之间的最小成本路径(图3a),确定数据点之间的相似性和差异性,实现自动追层。通过最小成本路径的搜索和调整,能够去除噪声和异常值的影响,从而提高数据的处理质量和可靠性。相比较于传统地层切片方法,该方法更适合实际地层,精度更高,得到的同相轴具有更加清晰的层序信息,适用于构造、沉积特征复杂的断陷湖盆。

在自动追踪层位得到高分辨率层序信息的层位体约束下,采用Wheeler域变换分析地震波在传播过程中的能量损失来实现地震衰减信息的提取。

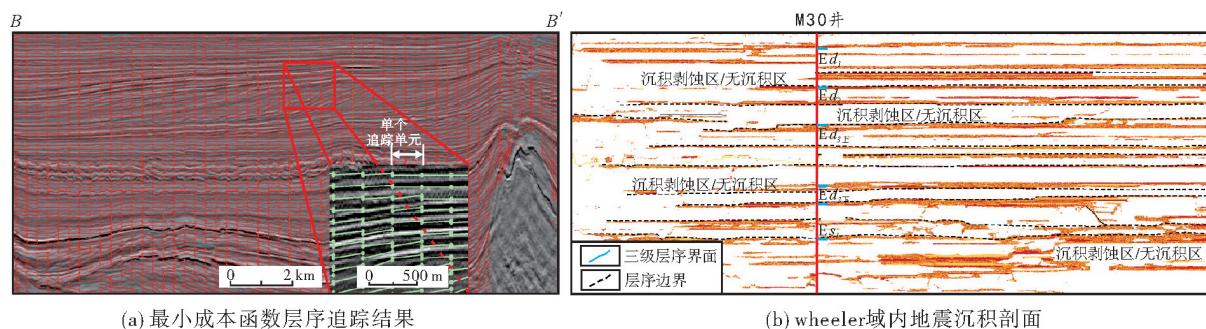


图3 最小成本函数层序追踪法和wheeler域内地震沉积剖面

Fig. 3 Minimum cost function sequence tracking method and seismic sedimentary section in wheeler domain

Wheeler域变换能够解决细分层序的问题,按地质年代拉平每一个在时间域追踪出砂体的年代地层同相轴,并按照沉积时间次序重新排列,进而刻画出地层的地质时间-空间域展布以及有无沉积或侵蚀状况。在图3b中,有颜色区域为沉积区域,而空白区域代表地层被侵蚀或无沉积发生^[23-24]。与原始剖面相比较,基于最小成本函数法的Wheeler域剖面能够直观提高等时切片的横向分辨率,可以通过刻画砂体平面形态来识别薄层,让砂体更具有等时性。

2.3 相对泊松比识别岩性

受断陷湖盆的中深层埋藏深度的影响,原始振幅或阻抗对岩性信息不敏感。为了更好地识别断陷湖盆的中深层岩性信息,本次研究通过AVO属性叠前反演,寻找适合表征岩性信息的属性。

AVO分析探究地震反射波振幅随入射角在叠前道集上的变化特征,通过导出泊松比、体积模量等弹性常数分析地下反射界面两侧的岩性信息,进而实现测定含油气性的目的^[25]。该方法的理论基础是Zoeppritz方程简化后的Shuey方程,表达了入

射波、反射波以及折射波的振幅与入射角的关系^[26],表达式为:

$$R(\theta) \approx A + B \sin^2 \theta + C(\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (1)$$

式(1)中: θ 为入射角,单位为($^{\circ}$); A 、 B 、 C 分别为截距、梯度、曲率,无量纲; R 为反射系数,无量纲。

泊松比 σ 是表示材料横向变形的弹性常数^[27]。与泊松比相比,相对泊松比敏感性更高,响应更好,井震油气显示吻合度最高。因此,通过假定地层波阻抗连续可微积分,对泊松比进行积分,去除直流部分,变限求和,使其反射率含有稳定的岩性信息,保持原始的地震横向分辨率,能够更加准确地描述地层岩性^[28]。计算相对泊松比的表达式为:

$$\sigma(t) = \exp \left[2 \sum_{T=t_0}^t (A + B) \right] = \exp \left[\sum_{T=t_0}^t \left(\frac{1}{0.5 - \sigma} - \frac{1}{1 - \sigma} \right) \Delta \sigma \right] \quad (2)$$

式(2)中: $\sigma(t)$ 为相对泊松比,无量纲; t 为时间, T 为时间延迟, t_0 为初始时间,单位均为ms。

在相对泊松比属性砂体预测结果中,相比较于原始地震剖面(图4a),相对泊松比属性剖面(图4b)分辨率更高,能够突出局部特征,有助于识别和区

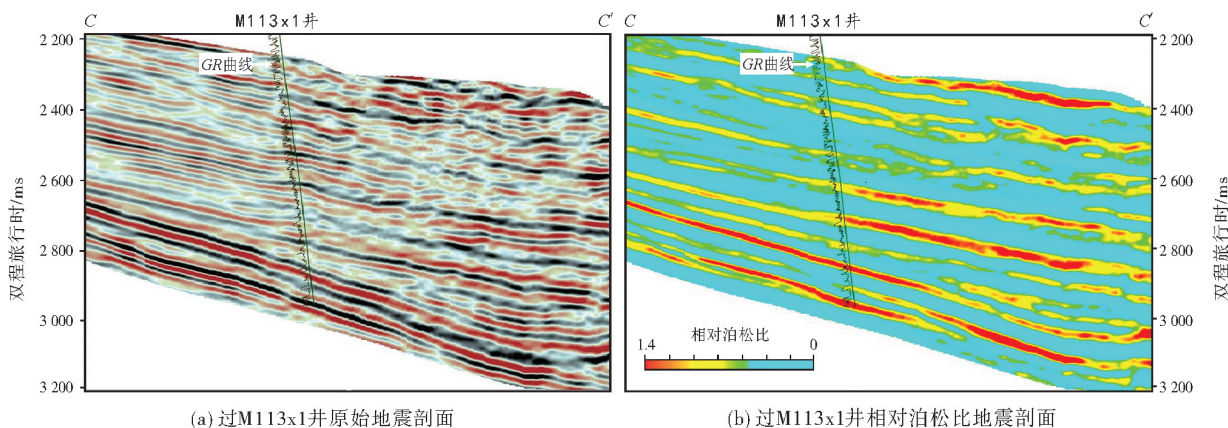


图4 原始剖面与相对泊松比剖面对比

Fig. 4 Comparison between the original section and the relative Poisson's ratio section

分不同岩性特征。在图4b剖面中,从蓝色到绿色、黄色、红色依次代表相对泊松比属性由强到弱,相对泊松比的大小表示砂体含量的多少以及砂岩分布情况。另外相对泊松比属性剖面能够抑制噪声,提高剖面信噪比,更有助于岩性分析。

不同的岩性通常具有不同的波阻抗和相对泊松比值。为进一步验证相对泊松比属性有利于识别岩性,选取南堡凹陷老爷庙地区的4口井的资料,将东三上亚段的纵波阻抗信息作为横轴,相对泊松比值作为纵轴,进行交会分析(图5)。结果显示,相对泊松比区分砂泥岩效果良好,形成较为明显的岩性点数据集群分布特征。

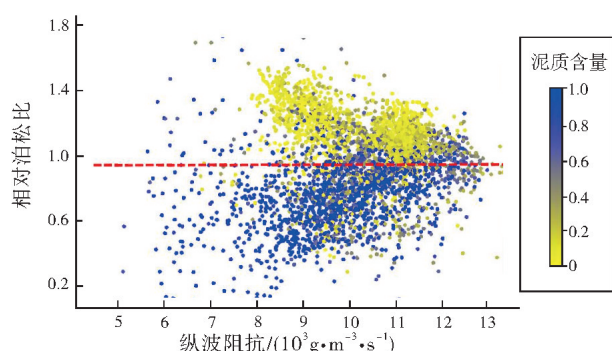


图5 南堡凹陷老爷庙东三上亚段相对泊松比与纵波阻抗交会图

Fig. 5 Crossplot of relative Poisson's ratio and longitudinal wave impedance of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

3 应用效果

老爷庙东三上亚段砂体薄、横向变化快、非均质性强,且砂体纵向上具有“下砾上砂”的沉积特征。

通过“三域三要素”地震沉积联合表征技术的应用,结合对岩心、测井、地震资料的研究认识,实现了对老爷庙地区东三上亚段沉积微相展布特征的预测,效果良好。

3.1 东三上亚段下部近岸水下扇

研究区东三上亚段砂岩组合的下部特征:岩电参数密度为 2.6 g/cm^3 ,声波速度较高、自然伽马值低、电阻率值高且深浅电阻率重合,解释为干层;岩性以灰色—深灰色砾岩为主,含部分灰色—深灰色泥岩、细—粉砂岩。砂层韵律为自下而上变细,交错层理发育,且重力流发育程度不高,主要受牵引流控制,属于近岸水下扇沉积(图6a)。测井曲线幅度为中到高值的齿形曲线组合,形状为指状和漏斗形组合,视电阻率是低平的齿形、箱形组合(图6b),地震内部反射结构为杂乱—空白反射特征,地震相呈短楔状(图6c)。

利用“三域三要素”方法对研究区东三上亚段单一扇体沉积结构进行地震沉积表征,单扇体扇根、扇中、扇缘结构刻画效果良好,特征明显(图7)。东三上亚段SQ3旋回下部近岸水下扇沉积相早期至晚期期间,庙南沉积区西部相对泊松比值减小,振幅属性增强,且属性体面积明显增大;庙南东部相对泊松比值变化不大,但属性体面积明显缩减。这表明受庙南断裂构造带的影响,庙南西部沉积的扇体持续向西推进(约2.8 km),沉积面积增大,而庙南东部沉积的扇体虽持续向南推进(约2.2 km),但沉积面积减小,由裙边状逐渐演变为狭长条带状水下分流河道沉积。庙南断坡控制了南部裙边状砂体及斜坡带展布特征(图8)。

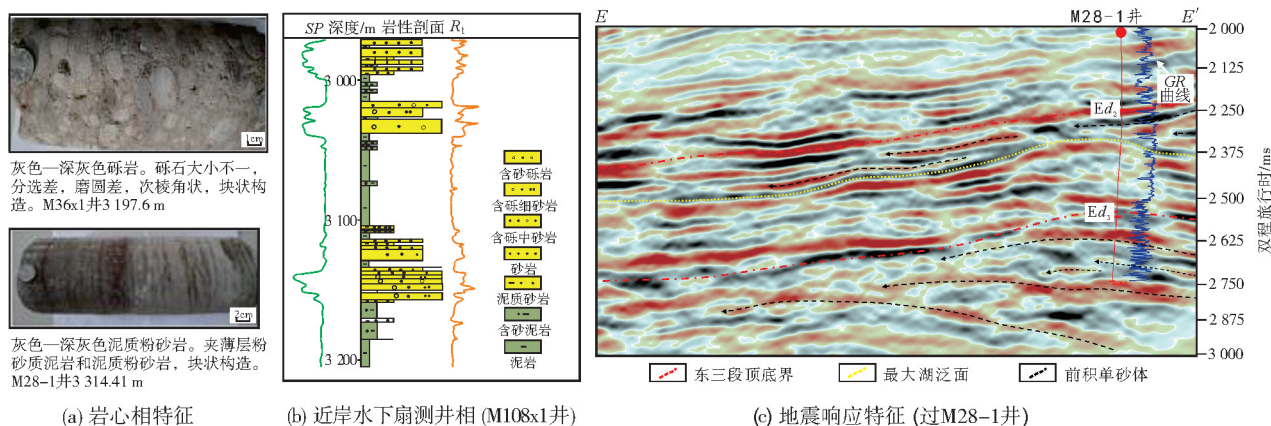


图6 南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段下部近岸水下扇岩相、测井相及地震响应特征

Fig. 6 Lithofacies, logging facies and seismic response characteristics of nearshore subaqueous fan at the bottom of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

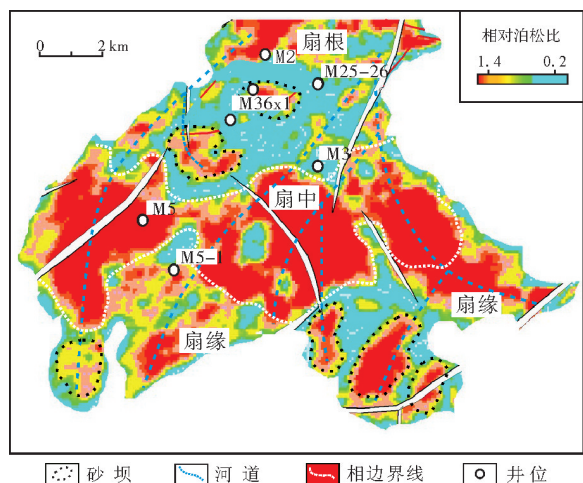


图7 南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段下部单一扇体沉积结构识别图

Fig. 7 Single fan sedimentary structure recognition map at the bottom of upper submember of Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

3.2 东三上亚段上部辫状河三角洲

研究区东三上亚段砂岩组合的上部特征:岩性以灰色—深灰色细砂岩、中粗砂岩以及暗色泥岩为主,局部含有砾石,磨圆较差,具有交错层理,属于辫状河三角洲沉积环境(图9a)。沉积微相为水下分流河道、河口坝及席状砂。测井曲线特征为齿状箱形、漏斗形、箱形—漏斗形组合(图9b),地震相表现为连续中振幅高频席状相(图9c)。

将“三域三要素”方法应用于老爷庙地区东三上亚段,首先应用能量半衰时属性对砂体结构进行识别,之后通过基于最小成本函数法的 Wheeler 域变换提取地震衰减信息,进而得到更加清晰的层序信息,最后将以上结果作为基础数据,在叠前阶段使用 AVO 分析优选敏感参数相对泊松比识别岩性。

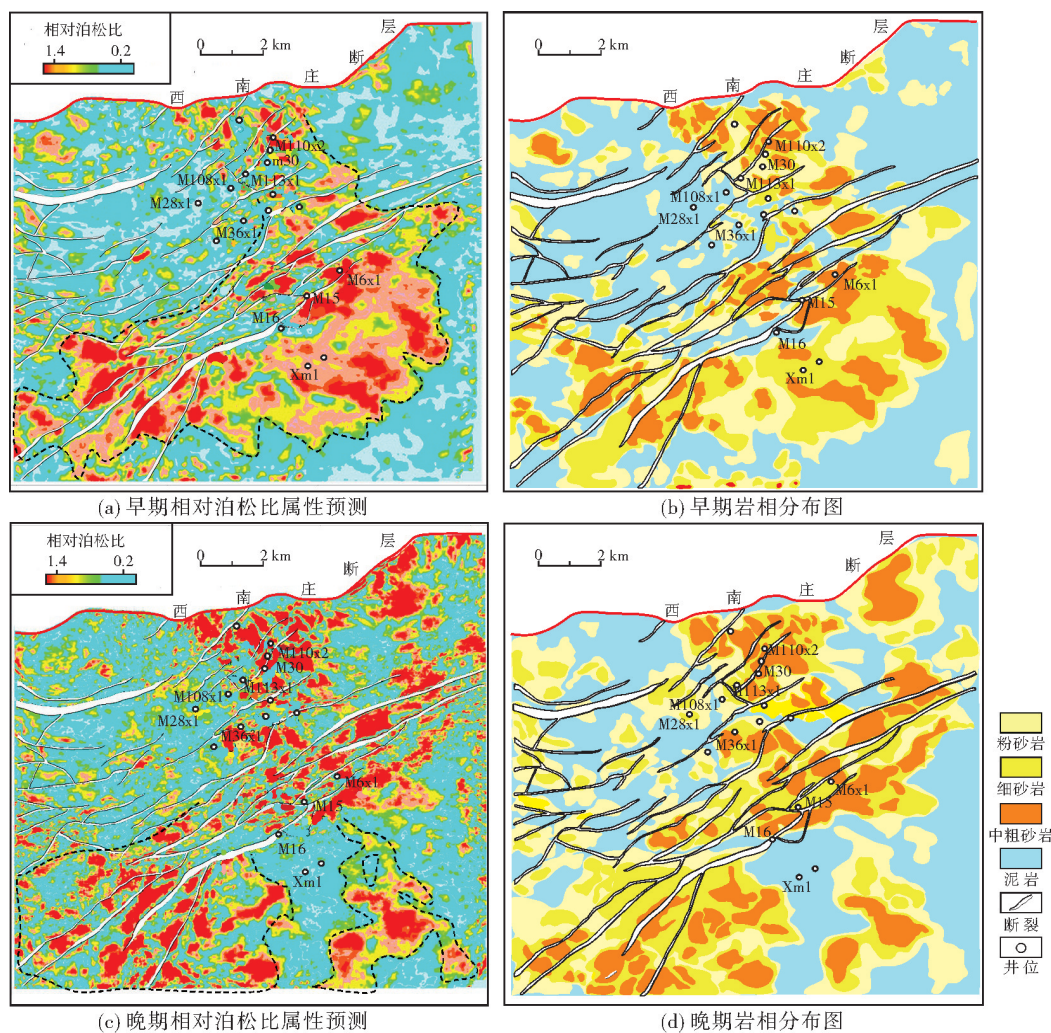


图8 南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段下部近岸水下扇早期—晚期相对泊松比属性预测和岩相分布图

Fig. 8 Relative Poisson's ratio attribute prediction and lithofacies distribution maps at the bottom of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

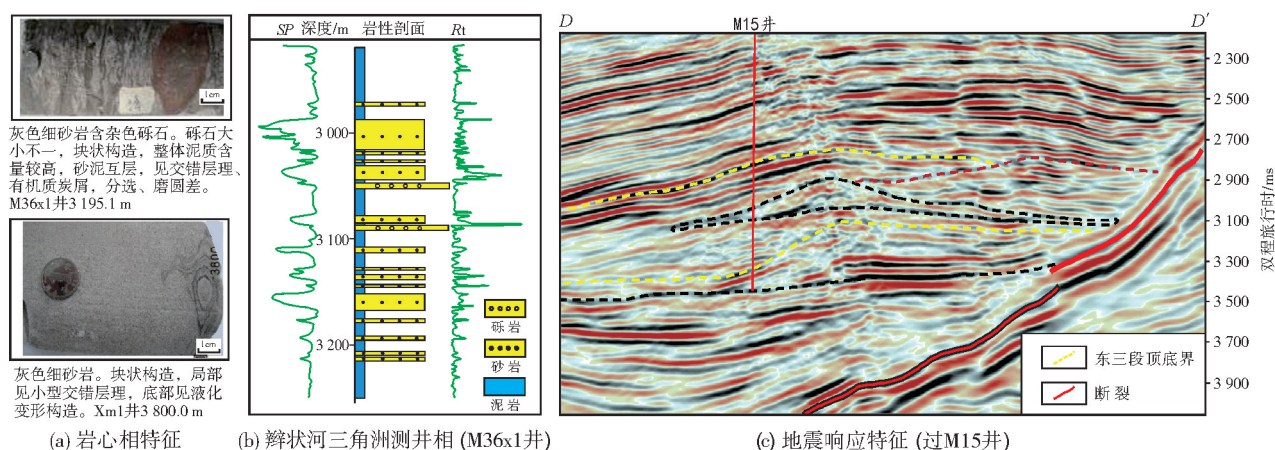


图9 南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段上部辫状河三角洲岩相、测井相及地震响应特征

Fig. 9 Lithofacies, logging facies and seismic response characteristics of braided river delta at the top of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

相对泊松比参数的储层预测平面图(图10a)显示:以砂岩发育为主的沉积微相的相对泊松比属性为中等到高振幅反射,相对泊松比的数值范围集中在1.2~1.6之间;以泥岩发育为主的沉积微相属性为弱反射,相对泊松比的数值范围为0.2~0.8。

预测结果显示砂岩发育区主要在中北部(图10b),东部、东北部区域发育部分砂岩。沉积相以辫状河三角洲为主,发育三角洲平原、分流河道、三角洲前缘、河道间等沉积微相。结构上具有多条辫状河道的迁移摆动特征,水下分流河道砂体和滩坝砂体为

主要储集体。研究区北部发育连片分布的辫状河三角洲砂体,另外,受控于较强的波浪作用,沉积相平面上多呈交织条带状,局部强能量反射呈斑块状,钻井显示为河间滩沉积,呈“砂岛式”发育。沉积构造类型丰富,砂体组合样式多,以侧向叠置为主,多期迁移叠置砂体为油气横向运移的有利通道。

将研究区内的钻井信息与预测储层厚度进行了对比,误差精度小于等于2.5 m(表1),预测结果与钻井结果符合率达到90%,反映了该预测方法的合理性和有效性。

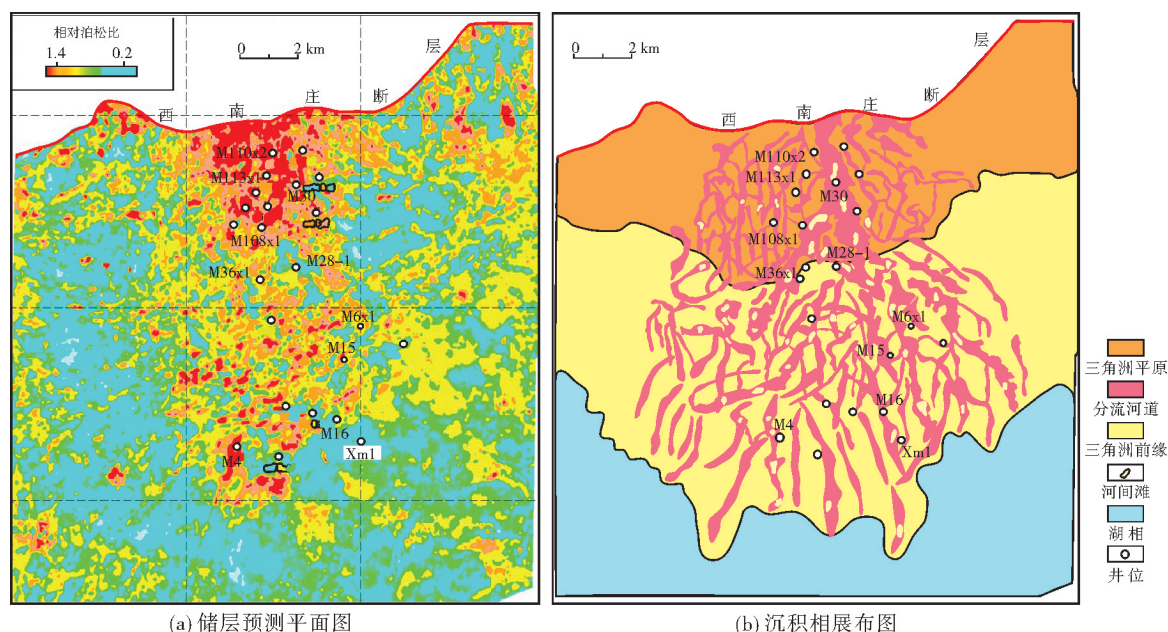


图10 南堡凹陷老爷庙地区东三上亚段上部辫状河三角洲储层预测及沉积相展布图

Fig. 10 Reservoir prediction and sedimentary facies maps of braided river delta at the top of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

表1 南堡凹陷老爷庙东三上亚段预测储层厚度与已有钻井结果对比

Table 1 Comparison of the predicted reservoir thickness and existing drilling results of upper submember of the Dongying Member 3 in Laoyemiao area, Nanpu Sag

| 小层 | M108x1井 | | | M113x1井 | | | M110x2井 | | |
|-----|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|
| | 预测厚度/m | 实钻厚度/m | 误差/m | 预测厚度/m | 实钻厚度/m | 误差/m | 预测厚度/m | 实钻厚度/m | 误差/m |
| S-1 | 8.2 | 9.9 | -1.7 | 7.6 | 8.8 | -1.2 | 6.1 | 5.8 | 0.3 |
| S-2 | 13.5 | 12.6 | 0.9 | 15.6 | 13.8 | 1.8 | 10.2 | 10.7 | -0.5 |
| S-3 | 22.6 | 20.1 | 2.5 | 8.2 | 6.1 | 2.1 | 3.6 | 3.5 | 0.1 |
| S-4 | 12.6 | 13.7 | -1.1 | 4.3 | 3.9 | 0.4 | 5.8 | 4.3 | 1.5 |
| S-5 | 17.2 | 14.6 | 2.4 | 15.1 | 13.8 | 1.3 | 2.2 | 2.8 | -0.6 |
| S-5 | 9.6 | 10.6 | -1.0 | 3.8 | 4.3 | -0.5 | 3.2 | 4.1 | -0.9 |
| S-6 | 5.7 | 8.0 | -2.3 | 2.2 | 2.0 | 0.2 | 2.7 | 2.5 | 0.2 |
| S-7 | 11.2 | 10.7 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 9.6 | 8.7 | 0.9 |
| S-8 | 21.0 | 23.1 | -2.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4 结 论

针对断陷湖盆中深层埋藏深、有效信号弱、砂体横向变化快、砂体刻画不清的问题,改善和更新了经典地震沉积学方法,形成了“三域三要素”地震沉积解释技术,在南堡凹陷老爷庙东营组三段上亚段得到应用,取得了良好的应用效果:

(1)老爷庙地区东三段上亚段下部发育近岸水下扇,以砾岩沉积为主,上部发育辫状河三角洲沉积体系,以中、细砂岩沉积为主,纵向上具有下粗上细的正旋回沉积结构。

(2)老爷庙地区东三段上亚段以老爷庙走滑断裂转换带为界,庙北河间滩较发育,呈“砂岛式”沉积;庙南发育近岸水下扇沉积体系,由沉积早期至沉积晚期扇体规模先扩大后缩小,形态由裙边状逐渐演化为狭长条带状水下分流河道沉积,且扇体靠近油源断裂,是勘探开发的接替区。

(3)“三域三要素”沉积储层地震表征方法,对于复杂构造区沉积微相表征、有利储层分布预测具有较好的适用性,砂体厚度预测符合率达到90%。研究成果为南堡凹陷老爷庙地区增储上产提供了有效技术支撑,也为渤海湾盆地其他区域中深层地震沉积砂体表征提供了方法借鉴。

参 考 文 献

- [1] 徐春春, 邹伟宏, 杨跃明, 等. 中国陆上深层油气资源勘探开发现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1139-1153.
XU Chunchun, ZOU Weihong, YANG Yueming, et al. Status and prospects of exploration and exploitation of the deep oil & gas resources onshore China[J]. Natural gas geoscience, 2017, 28(8): 1139-1153.
- [2] JIANG Shu, FENG Youliang, CHEN Lei, et al. Multiple-stacked hybrid plays of lacustrine source rock intervals: case studies from lacustrine basins in China[J]. Petroleum science, 2017, 14(3): 459-483.
- [3] CAO Yingchang, WANG Yanzhong, GLUYAS J G, et al. Depositional model for lacustrine nearshore subaqueous fans in a rift basin: the Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Sedimentology, 2018, 65(6): 2117-2148.
- [4] YANG Jinxiu, XIA Ying, YUAN Jianpeng, et al. The depositional model of the Lower Cretaceous Nantun Formation and its implications for oil accumulation in the northern Wuerxun Sag of Hailar Basin, NE China[J]. Sedimentary geology, 2022, 438: 106208.
- [5] 刘宇, 朱筱敏, 张自力, 等. 基于地震沉积学恢复断陷湖盆古水系及其演化过程: 以辽河拗陷西部凹陷盘山洼陷沙河街组三段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 207-222.
LIU Yu, ZHU Xiaomin, ZHANG Zili, et al. Restoration of the paleo-drainage system in faulted lacustrine basin and its evolution process based on seismic sedimentology: a case study of Member 3 of Shahejie Formation in Panshan subsag, western sag of Liaohe Depression[J]. Acta petrolei sinica, 2022, 43(2): 207-222.
- [6] LIU Hai, ZHANG Mian, CHI Xiaoming. Application of seismic sedimentology in a fluvial reservoir: a case study of the Guantao Formation in Dagang Oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. Geological journal, 2021, 56(10): 5125-5139.
- [7] WANG Wenguang, LIN Chengyan, ZHANG Xianguo, et al. Discussion of seismic diagenetic facies of deep reservoir in the East China Sea Basin[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2022, 208(Part A): 109352.
- [8] 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 等. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征: 以渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷肃宁地区为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 566-576.
ZENG Hongliu, ZHAO Xianzheng, ZHU Xiaomin, et al. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: a case from the Suning area of Raoyang Sag in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, NE China[J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(5):

- 566-576.
- [9] 姜敏, 蔡华, 何贤科, 等. 地震沉积学在东海陆架盆地西湖凹陷河流-三角洲相储集层刻画中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 125-138.
- LOU Min, CAI Hua, HE Xianke, 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): 125-138.
- [10] 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1647-1661.
- TONG Hengmao, ZHAO Baoyin, CAO Zhe, et al. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta geologica sinica, 2013, 87(11): 1647-1661.
- [11] 姜华, 王华, 林正良, 等. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 976-982.
- JIANG Hua, WANG Hua, LIN Zhengliang, et al. Periodic rift-ing activity and its controlling on sedimentary filling of Paleogene period in Nanpu Sag[J]. Acta sedimentologica sinica, 2009, 27(5): 976-982.
- [12] 姜华, 王建波, 张磊, 等. 南堡凹陷西南庄断层分段活动性及其对沉积的控制作用[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1047-1053.
- JIANG Hua, WANG Jianbo, ZHANG Lei, et al. Segment activity of Xi'nanzhuang fault in Nanpu Sag and its controlling on sedimentary process[J]. Acta sedimentologica sinica, 2010, 28(6): 1047-1053.
- [13] 朱光有, 张水昌, 王拥军, 等. 渤海湾盆地南堡大油田的形成条件与富集机制[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 97-113.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, WANG Yongjun, et al. Forming condition and enrichment mechanism of the Nanpu Oilfield in the Bohai Bay Basin, China[J]. Acta geologica sinica, 2011, 85(1): 97-113.
- [14] 徐安娜, 董月霞, 邹才能, 等. 南堡凹陷岩性-地层油气藏区带划分与评价[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 272-280.
- XU Anna, DONG Yuexia, ZOU Caineng, et al. Division and evaluation of oil-gas prolific zones for litho-stratigraphic reservoirs in the Nanpu Sag[J]. Petroleum exploration and development, 2008, 35(3): 272-280.
- [15] 管红, 朱筱敏. 南堡凹陷东营组层序地层格架与沉积体系[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 730-736.
- GUAN Hong, ZHU Xiaomin. Sequence framework and sedimentary facies of Ed Formation in Paleogene, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2008, 26(5): 730-736.
- [16] 董月霞, 杨赏, 陈蕾, 等. 渤海湾盆地辫状河三角洲沉积与深部储集层特征: 以南堡凹陷南部古近系沙一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 385-392.
- DONG Yuexia, YANG Shang, CHEN Lei, et al. Braided river delta deposition and deep reservoir characteristics in Bohai Bay Basin: a case study of Paleogene Sha 1 member in the south area of Nanpu Sag[J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(4): 385-392.
- [17] 赵彦德, 刘洛夫, 张枝焕, 等. 南堡凹陷古近系层序地层格架中烃源岩分布与生烃特征研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 1077-1085.
- ZHAO Yande, LIU Luofu, ZHANG Zhihuan, et al. Distribution and hydrocarbon generation of the Eocene source rocks in a sequence stratigraphic framework in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 2008, 26(6): 1077-1085.
- [18] JIANG Zhenxue, DONG Yuexia, LI Hongyi, et al. Limitation of fault-sealing and its control on hydrocarbon accumulation: an example from the Laoyemiao Oilfield of the Nanpu Sag[J]. Petroleum science, 2008, 5(4): 295-301.
- [19] 常少英, 穆晓亮, 曾溅辉, 等. 深层隐伏型岩溶储集体地震预测关键技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(增刊2): 80-86, 122.
- CHANG Shaoying, MU Xiaoliang, ZENG Jianhui, et al. Key technologies for deep concealed karst reservoirs prediction based on seismic data and application[J]. Oil geophysical prospecting, 2022, 57(S2): 80-86, 122.
- [20] 王立, 田作基, 胡欣, 等. Kyzylia南部地区变质岩潜山油气藏的勘探技术: 多种地震属性的提取及研究[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊2): 158-160, 173.
- WANG Li, TIAN Zuoji, HU Xin, et al. Exploration technology of metamorphics buried-hill oil/gas reservoir in southern area of Kyzylia: detection and analysis of multiple seismic attributes[J]. Oil geophysical prospecting, 2008, 43(S2): 158-160, 173.
- [21] 罗琪, 黄时卓, 史德锋, 等. 利用能量半衰属性识别涪西南凹陷砂泥薄互层组合中浊积砂体[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 273-281.
- LUO Qi, HUANG Shizhuo, SHI Defeng, et al. Recognizing turbidite sand bodies in thinly interbedded sand-shale reservoir in the Weixinan Depression by energy half-time attributes[J]. Earth science frontiers, 2021, 28(1): 273-281.
- [22] 董艳蕾, 朱筱敏, 耿晓洁, 等. 利用地层切片研究陆相湖盆深水滑塌浊积扇沉积特征[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 386-396.
- DONG Yanlei, ZHU Xiaomin, GENG Xiaojie, et al. Using the stratal slice to study the depositional characteristics of deep-water slumped turbidite fans in continental lake basin[J]. Earth science frontiers, 2015, 22(1): 386-396.
- [23] 毕海龙, 李斌, 聂万才, 等. 地震沉积学在下石盒子组河流相层序界面识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 191-195.
- BI Hailong, LI Bin, NIE Wancai, et al. Application of seismic sedimentology in recognition of fluvial facies stratigraphic sequence interface for Lower Shihezi Formation[J]. Oil geophysical prospecting, 2010, 45(S1): 191-195.
- [24] 殷文, 朱剑兵, 李援, 等. 基于地震分频调谐体和 Wheeler 转换技术的薄储层预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(6): 1269-1282.
- YIN Wen, ZHU Jianbing, LI Yuan, et al. Thin reservoir prediction based on seismic segmented-frequency band tune and Wheeler transformation[J]. Oil geophysical prospecting, 2018, 53(6): 1269-1282.
- [25] YIN Xingyao, CHENG Guangsen, ZONG Zhaoyun. Non-linear AVO inversion based on a novel exact PP reflection coefficient[J]. Journal of applied geophysics, 2018, 159: 408-417.

- [26] 刘东琴, 李晓恒, 汪关妹, 等. AVO技术在苏75区块含气性检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增刊1): 109–114, 202–203.
- LIU Dongqin, LI Xiaoheng, WANG Guanmei, et al. Hydrocarbon detection with AVO in Block SU-75[J]. Oil geophysical prospecting, 2013, 48(S1): 109–114, 202–203.
- [27] 周林, 廖建平, 李景叶, 等. 基于精确Zoeppritz方程的储层含油气性预测方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3788–3806.
- ZHOU Lin, LIAO Jianping, LI Jingye, et al. Prediction method of reservoir oil-gas potential based on exact Zoeppritz equations[J]. Chinese journal of geophysics, 2021, 64(10): 3788–3806.
- [28] 陈学国, 徐仁, 穆星, 等. 相对泊松比分析技术在平湖地区中深层砂岩气藏检测中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 63–65.
- CHEN Xueguo, XU Ren, MU Xing, et al. Application of relative Poisson's ratio analysis technique to the detection in gas reservoirs with middle-deep sandstones in Pinghu area[J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2007, 14(1): 63–65.

编辑: 黄革萍

Study on seismic sedimentology of middle-deep sand bodies in faulted lacustrine basin: taking the upper third member of Dongying Formation in Laoyemiao area of Nanpu Sag as an example

MU Xiaoliang¹, CHANG Shaoying^{2, 3}, NIU Huapeng³, LIU Lingli², WANG Mengxiu²

1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration;
2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 3. China University of Petroleum(Beijing)

Abstract: The Laoyemiao area of Nanpu Sag has developed slope-controlled sand-type reservoirs. The middle and deep strata in this area are rich in oil and gas resources and have broad exploration prospects, where is an important replacement area for exploration and development. At present, there are some problems in this field, such as deep burial depth, weak effective seismic signal, rapid lateral change of sand body and unclear description of sand body shape, which restrict the deployment of high-efficiency wells and the tapping of remaining oil in reservoirs. Based on the analysis of core, logging and seismic data in the study area, a new seismic sedimentary interpretation method for “three domains and three elements” has been explored, which includes three seismic sedimentary interpretation methods, such as stratigraphic structure identification at energy half-life, sequence stratigraphic tracking by minimum cost function method and lithology identification by relative Poisson's ratio. It is shown that: (1) The sedimentary body of upper submember of the Dongying Member 3 in the study area has the sedimentary characteristics of “bottom gravel and top sand” in the longitudinal direction, that is, nearshore subaqueous fan deposition is developed at the bottom and braided river delta deposition is developed at the top. (2) The upper submember of the Dongying Member 3 in the Laoyemiao area is bounded by the Laoyemiao strike-slip fault conversion zone, and multiple point dams are developed to the north of the boundary, showing sand island deposition; the fan delta sedimentary system is developed in the south of the boundary. From the early deposition to the late deposition, the scale of the fan body first expands and then shrinks, and the shape gradually evolves from the skirt shape to the narrow strip underwater distributary channel deposit, and the fan body is closed to the oil source fault, so it is the replacement area of exploration and development. (3) The method of “three domains and three elements” seismic sedimentary reservoir characterization has good applicability for sedimentary microfacies characterization and favorable reservoir distribution prediction in complex structural areas, and the coincidence rate of sand body thickness prediction reaches 90%.

Key words: seismic sedimentology; three domains and three elements; faulted lacustrine basin; Dongying Formation; Nanpu Sag

MU Xiaoliang, First author: PhD candidate at Institute of Geology, China Earthquake Administration, mainly engaged in geological and geophysical research. Add: No.1 Huayanlijia, Chaoyang District, Beijing 100029, China. E-mail: muxiaoliang1210@163.com

CHANG Shaoying, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research of geology and geophysics. Add: No.920 Xixi Rd., Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: csy991@163.com