

兴马地区沙三段陆相深水重力流储层综合预测

赵海涛^{1,2}, 孙赞东^{1,2}, 刘立峰^{1,2}, 张远银^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京); 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要 兴马地区位于辽河西部凹陷的中东部, 经 40 年的勘探, 沙二段以上地层已基本探明并投入生产。伴随勘探的深入, 沙三段重力流砂体已成为深层岩性油藏勘探的重点, 但由于重力流沉积砂泥混杂、横向变化快, 地震资料主频和信噪比均较低, 重力流砂体的储层特征和空间分布研究较为薄弱。层序地层学和地震储层预测是深层岩性油藏勘探的两大有效手段。通过建立研究区高精度层序地层格架, 将沙三段划分为 3 个层序, 重力流砂体集中发育在各层序的下部, 且以层序 SQ3 最为发育。在层序地层格架内, 综合地震属性、波形分类、分频属性、波阻抗反演等技术预测了重力流砂体的空间分布并优选出 4 个有利的岩性圈闭。经钻井证实, 预测结果较为准确。该方法可为辽河西部凹陷及其他地区岩性油气藏的勘探提供借鉴。

关键词 陆相深水重力流沉积; 层序地层; 地震属性; 波形分类; 分频属性; 波阻抗反演

中图分类号 P539.2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0047-05

Reservoir Characterization and Comprehensive Prediction of Non-marine Deep Water Deposits for Sha-3 Member in Xingma Area

ZHAO Haitao^{1,2}, SUN Zandong^{1,2}, LIU Lifeng^{1,2}, ZHANG Yuanyin^{1,2}

1. Lab for Integration of Geology and Geophysics, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The Xingma area is located in the mid-east of the western sag, Liaohe depression. The strata above Sha-2 Formation have been confirmed and put into production after 40 years' exploration. With the exploration and research in depth, the gravity flow of deposited sand bodies of Sha-3 member becomes a focus in lithologic reservoirs exploration. Due to low dominant frequency, low signal-to-noise ratio, rapid lateral change, and high frequency of layering inter-bedding, the studies are few with respect to reservoir characteristic and spatial distributions. The sequence stratigraphic classification and seismic reservoir prediction skills are two effective methods in the lithologic reservoir exploration for deeper strata. The Sha-3 member is divided into three sequences after the high resolution sequence stratigraphic framework is built up. The sandstone bodies are mainly distributed at the bottom of each sequence and mostly developed in sequence SQ3. On the basis of an isochronous stratigraphic framework, the seismic attribute identification, seismic waveform classification, frequency division technique, post-stack seismic inversion, and the forecasting reservoir technique are used to choose four good lithologic traps. The prediction results are verified by the new well drilling data. The research provides a reference for lithologic reservoir exploration in western sag, Liaohe depression and other areas.

Keywords non-marine deep water deposits; sequence stratigraphy; seismic attributes; seismic waveform classification; frequency division technique; post-stack seismic inversion

收稿日期: 2010-02-08

作者简介: 赵海涛, 博士研究生, 研究方向为油气成藏与分布规律, 电子信箱: geoscientist@qq.com; 孙赞东 (通信作者), 教授, 研究方向为开发地震、储层预测、各向异性、油气藏勘探, 电子信箱: zszd@cup.edu.cn

0 引言

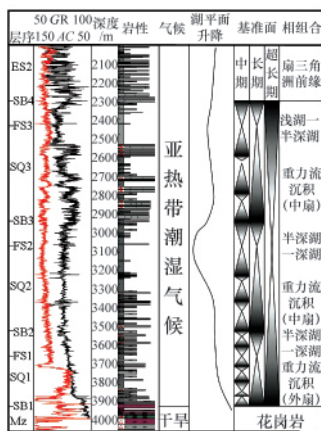
随着油气盆地勘探程度的提高,且构造油气藏已基本探明,岩性油气藏成为大油气田的勘探方向。在国内陆相断陷湖盆中,重力流沉积发育广泛,研究和生产实践证明,重力流砂体是一种重要的油气储层类型,是岩性油气藏的重要组成部分,开展重力流岩性油气藏预测研究对陆相岩性油气藏的勘探意义重大。由于重力流砂体横向变化快、隐蔽性强,勘探难度大,对重力流岩性油气藏的勘探需要采取配套的勘探思路和勘探技术^[1]。

兴马地区位于辽河西部凹陷的中东部,构造格局为“1 潜山 3 洼 1 陡坡”,即研究区中部发育兴隆台古近系潜山,在潜山的北部、西部和东南部分别发育陈家洼陷、盘山洼陷和清水洼陷,在研究区东侧以冷家逆断层为界与陡坡带、中央凸起等物源区相隔。经过多年勘探已发现太古宇、中生界和新生界沙三段、沙二段、沙一段、东营组 6 套含油层系,其中沙二段以上的浅层已基本探明并投入生产,随着勘探深入,沙三段成为勘探重点。沙三段沉积时期为西部凹陷的深陷期,东部的中央凸起为主要物源区,由于研究区距物源较近,伴随地貌高差的显著增大,中央凸起的粗碎屑物质向台安—大洼断层的下降盘快速倾泻,形成了多物源、多期次的重力流砂体沉积^[2-3]。受古地貌环境控制,重力流砂体非均质性较强,

多套砂体在垂向上、平面上均分布不连续,空间上夹于沙三段大套泥岩中,利于有利岩性圈闭和岩性油气藏的形成^[4-5]。本研究通过建立研究区高精度的层序地层格架,以分析沉积储层特征,把握重力流砂体的宏观赋存形态;通过地震属性分析、波形分类、分频和约束稀疏脉冲波阻抗反演等地球物理方法,实现了重力流砂体的精细刻画,结合储盖特征预测有利岩性圈闭的分布。

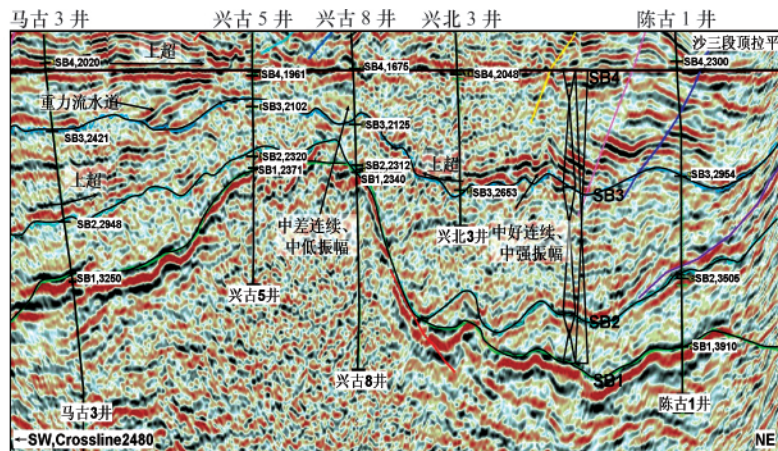
1 高精度层序地层格架

研究区地质条件复杂,重力流砂体具有多期次、多物源的特点,空间分布特征不易把握。基于三维地震资料精细解释(400km²)、测井资料和岩屑资料解释(66 口井)、岩心观测(16 口井,岩心总长度 168.64m),运用精细地层划分和等时对比技术,建立了储层级别的高精度层序地层格架(图 1)。沙三段共分为 3 个层序(自下而上依次标记为 SQ1、SQ2、SQ3,层序界面依次为 SB1、SB2、SB3、SB4),层序界面的识别主要依据岩电突变、颜色变化、地层叠置方式、地震反射特征、地震反射终止方式。研究区无明显地形坡折,初始湖泛面不易识别,湖泛期和高位期均以大套泥岩沉积为主,地震资料缺乏明显的波阻抗界面,因此体系域的划分主要依据钻测井资料,划分为湖侵体系域和高位体系域。



(a) 测井层序划分

(a) Well logging sequence stratigraphy division



(b) 井震标定层序地层格架

(b) Well calibrated seismic stratigraphic framework

图 1 研究区陈古 1 井沙三段高精度层序地层格架

Fig. 1 High resolution sequence stratigraphic framework of well Chg-1 for Sha-3 member in the study area

通过划分对比,研究区沙三段层序特征为:①层序 SQ1 为大套湖相泥岩夹薄层泥质粉砂岩、细砂岩沉积,地震上为一套弱振幅、差连续反射;底界面 SB1 为沙三段与下伏太古界、中生界地层的分界面,表现为界面下安山岩、玄武岩、花岗岩和砂砾岩等与界面上砂泥岩地层的岩电突变,地震上可见下削上超的特征;顶界面 SB2 显示为退积作用和进积作用的转换面,地震剖面上仅局部地区可见中等振幅的地震反射同向轴;湖泛面 FS1 对应于电阻率曲线的低平极限位置,代

表湖泛期的泥岩沉积;②层序 SQ2 主要为大套湖相泥岩夹薄层粉砂岩、细砂岩沉积,地震剖面整体为中弱振幅、中差连续反射;重力流砂体主要分布在湖侵体系域下部,且研究区南部较为发育,高位体系域主要为大套湖相泥岩夹薄层粉砂质泥岩和泥质粉砂岩沉积;湖泛面 FS2 对应于大套泥岩的中部和电阻率曲线的低平极限位置,与沙三期最大湖泛面(MFS)一致;③层序 SQ3 主要为大套湖相泥岩与厚层砾岩、砂砾岩和含砾砂岩的互层;重力流砂体主要分布在湖侵体系域下

部,地震上对应于层序底面 SB3 之上的大套中强振幅、中好连续反射;高位体系域多为大套湖相泥岩夹薄层泥质粉砂岩沉积,对应于层序顶面 SB4 之下的大套中弱振幅、差连续反射,层序顶面 SB4 为沙三段与沙一、二段地层的分界面,界面上为大套扇三角洲相砂砾岩沉积;④ 3 个层序构成一个超长期基准面旋回,层序 SQ1 形成于该旋回的上升期,层序 SQ2 形成于旋回的上升晚期和下降初期,层序 SQ3 形成于旋回的下降期;⑤ 重力流砂体的形成受基准面旋回变化的控制,对于单个层序,湖侵体系域的下部重力流砂体较为发育,与湖侵体系域上部和高位体系域的大套泥岩、薄层砂岩沉积构成“下粗上细”的沉积旋回;对于沙三段高级别层序,超长期基准面旋回下降期的层序 SQ3 重力流砂体最为发育。

层序地层学理论认为,生、储、盖等成藏要素在层序地层格架中均有一定的分布规律^[6]。对于研究区,层序 SQ1 和层序 SQ2 砂体厚度和规模均较小,粒度较细,储层条件相对较差,而层序 SQ3 砂体厚度较大,分布范围广,储层物性较好,因此层序 SQ3 是研究区重力流岩性油气藏勘探的最有利层段。

2 储集层特征

2.1 沉积特征

基于岩心观测、薄片和测井资料分析,研究区重力流砂体主要为近岸水下扇中扇辫状沟道微相和外扇亚相。中扇辫状沟道微相主要发育高密度浊流和碎屑流沉积;岩石分选较差,岩石类型多为砂砾岩和砂岩,粒度概率曲线斜率较低,粒度分布宽, Φ 值 ($\Phi = -\log_2 d$, d 为颗粒直径, mm) 分布在 1~6.5 mm 之间, $C-M$ 点群呈明显的平行于 $C=M$ 线分布 (C 为累积曲线上 1% 处对应的粒径, M 为累积曲线上 50% 处对应的粒径),反映沉积物密度大,下滑速度快,整体悬浮搬运的特点。砂砾岩中常见泥砾及呈撕裂状的泥质条带,颗粒支撑结构的砾岩较少,多发育在重力流沉积底部的冲刷面上。连续沉积的砂砾岩体单层厚度一般为几米,间歇期多发育薄的泥岩夹层,受后期重力流冲刷和叠置的影响,垂向上多形成大套厚层砂砾岩体。重力流砂体均发育正韵律为主的沉积层序,块状层理、递变层理和冲刷充填构造普遍发育,常见似鲍玛序列中的“AA”和“AB”组合。测井相多为中、高幅齿化的钟形、箱形组合,底部多突变接触或呈加速渐变特征,电阻率曲线一般呈锯齿状的中高值特征。中扇辫状沟道微相是近岸水下扇重力流沉积最为活跃的部分,砂砾岩体分布范围和厚度均较大,是最重要的骨架砂体和油气储集单元。

2.2 物性特征

研究区重力流砂体的岩石矿物成分复杂,石英含量平均 31.9%,长石含量平均 34.3%,岩屑含量平均 33.3%,以岩屑质长石砂岩为主,长石质岩屑砂岩次之,杂基以泥质为主,火山岩岩屑含量高。岩石物性以中孔低渗型为主,孔隙度一般为 3%~25%,平均为 16%;渗透率一般为 $1 \times 10^{-3} \sim 385 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $6.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;原生和次生孔隙较发育,次生孔隙随埋深加大而增加。重力流砂体的层内非均质性较强,是沉积部位、

砂岩层厚、粒级、分选好坏及杂基含量等综合作用的结果;在近源部位的中扇辫状沟道微相,砂体单层厚度一般在 20 m 以上,多为颗粒支撑,粒级粗且泥质含量较低,储层物性相对较好;在远离物源的外扇部位,砂体厚度一般小于 5 m,粒度较细,储层物性一般。

3 储集层预测

3.1 地震属性分析和波形分类技术

地震属性分析是通过提取、存储、检验、分析、确认和评估地震属性,建立地震属性与地质特征之间的关系,进而获取能反映储层或流体分布信息的方法^[7]。以层序 SQ3 为例,根据钻井及地震资料分析,重力流砂体的声波时差值一般为 74~86 $\mu\text{s}/\text{m}$;较泥岩(湖相泥岩)呈高速特征,地震剖面上呈高振幅、中好连续反射;而湖相泥岩多呈中弱振幅、差连续反射。通过制作精细的合成地震记录和井震标定,重力流砂体主要发育在层序界面 SB3 向上 100 ms 范围内。对该时窗提取并对比均方根振幅、最大绝对振幅、总能量、平均反射强度、平均瞬时频率、平均瞬时相位、有效带宽等属性,发现有效带宽、最大绝对振幅和均方根振幅属性能较好地反映研究区重力流砂体的分布,图 2(a)为提取的均方根振幅属性平面图,其中高值区(红色、黄色)代表了中扇辫状沟道微相分布区,中值区(绿色)为中扇前缘和外扇亚相分布区,低值区(蓝色)为深湖-半深湖微相分布区,自南向北共发育 4 个来自东部物源体系和 1 个来自西部物源体系的辫状沟道,平面上砂体彼此叠置,连片分布,预测结果与实际钻井资料吻合较好。

岩性变化引起地震波形态的变化,地震波形分类技术是采用神经网络算法定量刻画地震道的波形特征,通过对某一层地震数据逐道地对比分类,分析地震信号的横向变化,从而得出与地质层位相对应的地震相图^[8]。选用以层序顶面 SB4 和底面 SB3 为界的不等厚时窗,采用振幅、频率和相位参数进行训练,通过 30 次迭代,最终划分 10 种模型道。图 2(b)为模型道平面分布图,除马古 2 井的西南部地区受断层影响较大、地质意义不明确外,在其余地区,模型道 2~4 多呈片状分布,反映了中扇辫状沟道砂体的分布,模型道 1 多围绕模型道 2~4 呈斑块状,反映了外扇亚相薄层砂体的分布,模型道 5~10 在全区均有分布,与模型道 2~4 区分明显,为深湖-半深湖相泥岩夹外扇薄层砂体的分布。

3.2 分频技术

分频技术是利用储层厚度与调谐频率的关系,分不同频段进行地质不连续体追踪解释的技术^[9]。由于重力流砂体的厚度在不同的辫状沟道或同一辫状沟道的不同部位差异较大,调谐频率也不一样,低频段反映厚层砂体,高频段反映薄层砂体,因此通过调整子波频率及显示窗口的大小,可以在低频段刻画中扇辫状沟道厚层砂体的空间分布,在高频段刻画中扇前缘和辫状沟道间薄层砂体的空间分布。

采用基于非正交 Gabor-Morlet 小波变换的分频方法对研究区地震资料进行分频处理。该方法直接使用频率尺度参数

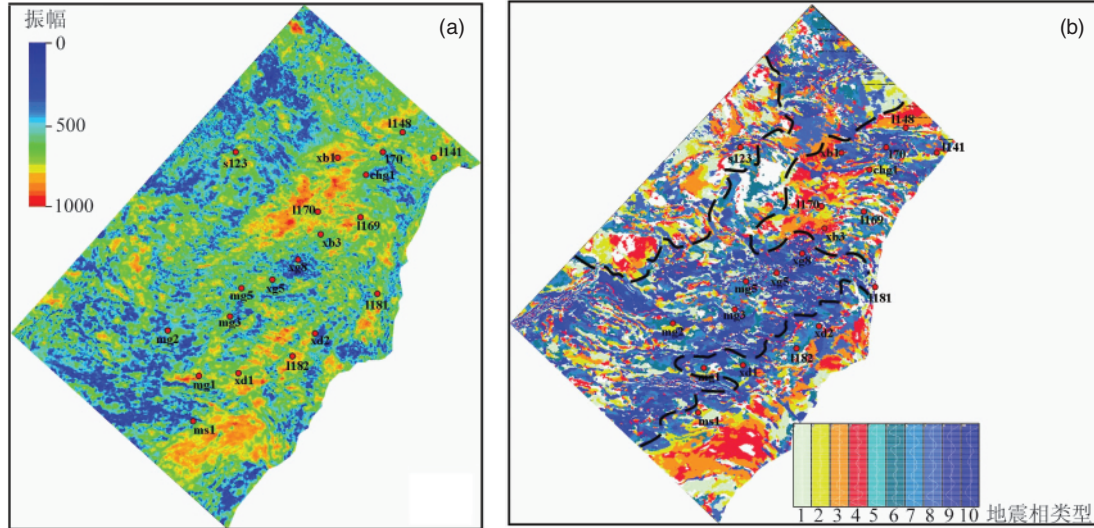


图 2 研究区沙三段层序 SQ3 均方根振幅地震属性(a)及波形分类(b)

Fig. 2 RMS attribute (a) and seismic waveform classification (b) for sequence SQ3 of Sha-3 member in the study area

实现频谱分解,克服了时窗大小对计算结果的影响,增强了地震信号的局部特性,较常规谱分解技术更能体现地质细节。通过制作精细的合成地震记录并标定不同频率的分频能量体,发现 22Hz 的分频能量体最能反映层序 SQ3 重力流砂体的分布。图 3(a)为利用最大熵、短时傅立叶、小波变换和非正交小波变换等 4 种分频方法提取的 22Hz 分频能量体剖面,非正交小波变换的分频方法对重力流砂体的刻画效果最好,重力流砂体均显示为调谐能量高值异常,对应于声波时差曲线的低值段(蓝线,左 150 μ s/m,右 50 μ s/m),大套泥岩均为低值异常,对应于声波时差相对高值或平直段。图 3(b)为基于非正交小波变换提取的 22Hz 分频能量平面分布图,时窗选取 SB3 向上 100ms 范围,其结果与均方根属性和波形分类的预测结果较一致,但分频属性反映的辫状沟道边界更清

晰,更能突出厚层有利储层的分布。

3.3 波阻抗反演

约束稀疏脉冲波阻抗反演是以地震解释层位和测井资料为约束,通过正反演结合不断迭代,求取地下介质的波阻抗,达到储层预测的目的^[10]。选取 47 口井位合理且声波时差、密度均较齐全的井资料,通过井震标定和井旁道地震子波的提取,加权平均求得沙三段地层的平均子波;结合 4 个层序界面和钻井数据建立低频模型,通过严格的质量控制,结合模型的低频分量获得最终反演结果。对比已有钻井资料标定,反演结果较好地反映了重力流砂体的分布。图 4 为研究区南部 Inline3862 线的反演剖面,该反演剖面分别通过马古 3 井和冷 182 井,重力流砂体均呈高波阻抗特征,层序 SQ3 发育 2 套重力流砂体,层序 SQ2 和层序 SQ1 各发育 1 套重力流

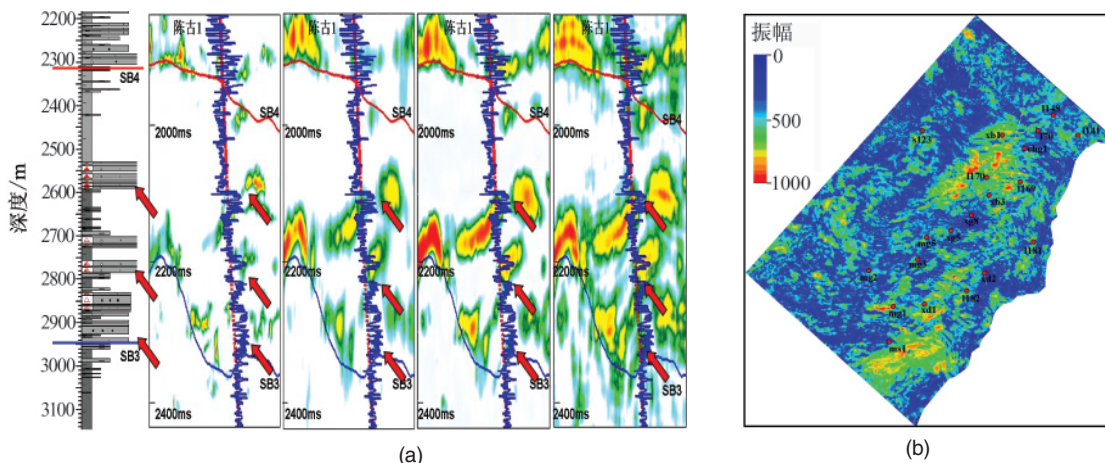


图 3 研究区沙三段过陈古 1 井分频能量剖面(a)及基于非正交小波变换提取的分频能量平面分布(b)

Fig. 3 Profiles show spectral decomposition energy along well Chg-1(a) and energy distribution in plain by the method of non-orthogonal wavelet transformation (b) for Sha-3 member in the study area

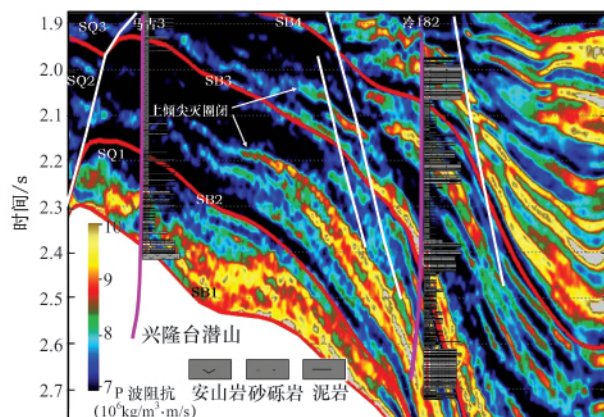


图4 过冷182井—马古3井反演剖面
Fig. 4 Post seismic inversion profile along Well L182 and Mg3

砂体。侧向上,重力流砂体的分布明显受兴隆台潜山古地貌特征的控制,在潜山顶部较薄,在潜山周缘的洼陷内较厚,波阻抗值向潜山顶部也逐渐降低,表明砂岩厚度逐渐变薄尖灭或物性逐渐变差,有利于上倾尖灭型岩性圈闭的形成;受后期构造影响,重力流砂体被断层错开,侧向上与泥岩对接形成封堵,垂向上受湖侵期大套湖相泥岩的封堵,有利于岩性-构造复合圈闭的形成。

通过研究区钻井储集特征分析,结合均方根属性、波形分类、分频技术和约束稀疏脉冲波阻抗反演技术的预测结果,在兴隆台潜山南部优选出4个有利的岩性圈闭(图5)。2008年部署的马古8井、马古9井等在沙三段地层均钻遇了预测的砂体,其中马古8井在层序SQ3获得油层(8m/1层)、油气同层(18m/6层)和低产油层(26m/4层)等较好,马古9井也获低产油层(40m/3层),表明预测结果较为可靠。

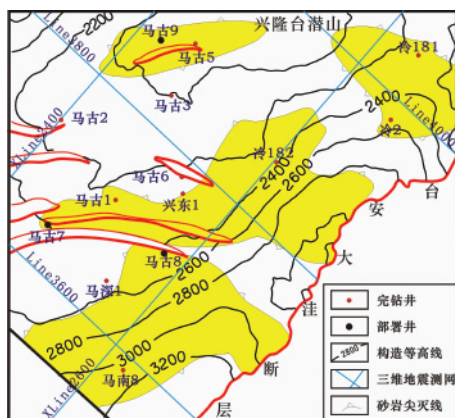


图5 研究区南部沙三段层序SQ3预测有利圈闭分布
Fig. 5 Distribution of predicted favorable traps for sequence SQ3 in the south of the study area

4 结论

兴马地区沙三段层序地层格架可分为3个层序,重力流砂体集中发育在各层序的下部,构成3个“下粗上细”的沉积

旋回,其中层序SQ3是研究区重力流岩性油气藏勘探的最有利层段。重力流砂体构成近岸水下扇中扇和外扇亚相,其中中扇辫状沟道微相高密度油流砂体较发育,储层物性好,为最主要油气储集单元。采用地震属性分析、波形分类、分频属性和波阻抗反演等方法对储层砂体进行准确预测,平面上由南向北发育4支东部物源体系和1支西部物源体系辫状沟道沉积,砂体彼此叠置、连片分布,剖面上重力流砂体向潜山顶部逐层尖灭,易形成上倾尖灭型岩性圈闭和岩性构造复合圈闭。结合钻井资料和构造特征,在研究区南部预测了4个有利岩性圈闭区,并取得较好的效果。该方法可为辽河西部凹陷及其他地区岩性油气藏的勘探提供借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 329.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 329.
- [2] 单俊峰, 陈振岩, 回雪峰. 辽河坳陷西部凹陷坡洼过渡带岩性油气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 42-45.
Shan Junfeng, Chen Zhenyan, Hui Xuefeng. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 42-45.
- [3] 李琳, 任作伟, 孙洪斌. 辽河盆地西部凹陷深层石油地质综合评价[J]. 石油学报, 1999, 20(6): 9-15.
Li Lin, Ren Zuowei, Sun Hongbin. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20 (6): 9-15.
- [4] 高先志, 李晓光, 李敬生, 等. 兴隆台地区沙三段砂体发育模式与岩性油气藏勘探[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 187-189.
Gao Xianzhi, Li Xiaoguang, Li Jingsheng, et al. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 187-189.
- [5] 侯彦东. 陈家洼陷沙三段油气藏成藏条件研究 [J]. 断块油气田, 2001, 8(4): 1-3.
Hou Yandong. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(4): 1-3.
- [6] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 11-15.
Gu Jiayu, Guo Bincheng, Zhang Xingyang. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 11-15.
- [7] 武丽, 于文芹, 杨立强, 等. 地震属性分析技术在波斯湾盆地中部S区块储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(5): 557-561.
Wu Li, Yu Wenqin, Yang Liqiang, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(5): 557-561.
- [8] 唐华凤, 王璞珺, 姜传金, 等. 波形分类方法在松辽盆地火山岩相识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 440-444.
Tang Huafeng, Wang Pujun, Jiang Chuanjin, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4): 440-444.
- [9] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 64-66.
Zhang Yanzhang, Yin Shoupeng, Zhang Qiaoling, et al. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 64-66.
- [10] 刘书会, 张繁昌, 印兴耀, 等. 砂砾岩储集层的地震反演方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 142-143.
Liu Shuhui, Zhang Fanchang, Yin Xingyao, et al. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 142-143.

(责任编辑 刘志远)