

基于地质模型监督的灰质泥岩发育区 砂岩储层预测方法

赵约翰

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:目前,岩性圈闭是济阳坳陷重要的增储领域,灰质泥岩的影响导致岩性圈闭描述准确率低,制约着该类油藏的勘探部署。通过测量灰质泥岩的XRF微量元素,由X衍射全岩矿物等微观分析入手,对灰质泥岩岩相进行划分,解决了灰质泥岩与砂岩难以区分的问题。通过不同岩性组合地质模型的地震反射特征正演模拟研究,明确了灰质泥岩发育区不同岩性组合的地震反射特征及其与振幅和频率属性的差异。在不同岩性组合的地震内部反射结构与外部几何形态的指导下,以地震多属性分析为基础开发基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术,可较好地预测灰质泥岩发育区砂岩储层有利相带。应用权值法相建模方法,并开发叠前地质统计学反演方法,精细刻画灰质泥岩发育区砂岩储层的空间展布规律,钻井证实取得了较好勘探效果。

关键词:灰质泥岩发育区 地质模型监督 波形分类 权值法相建模 叠前地质统计学反演 储层预测

中图分类号:TE122.2*21

文献标识码:A

A prediction method of sandstone reservoir in limy mudstone developmental area based on the geological model constraint

ZHAO Yuehan

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company,
SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The lithology trap is an important area which can contribute to the petroleum reserve in Jiyang Depression presently. Due to the influence of the limy mudstone, the accuracy of the description of lithology trap is low, which limits its exploration deployment. Based on the XRF microelement measurements of limy mudstone and various methods of micro-analysis such as XRD whole rock mineral analysis, the lithofacies of limy mudstone were divided to solve the geological problem that limy mudstone and sandstone were difficult to distinguish. Through the forward modeling research of seismic reflection characteristics of different lithology combination models, the reflection characteristics of different lithology combinations and their amplitude and frequency differences were determined in the limy mudstone development area. And multi-attribute neural network waveform classification constrained by geological models was established based on multiple seismic attributes analysis and under the guidance of internal seismic reflection structure and external geometry, which can be used to predict the favorable facies belt in the limy mudstone development zone. A new prestack geostatistical inversion method that was constrained by static model was proposed by the application of the method of weighted facies modeling, which can be used to depict the spatial distribution of sandstone reservoir in the limy mudstone development zone. And good exploration result was achieved and proved by drilling.

Key words: limy mudstone development area; geological model constraint; waveform classification; weighted facies modeling; prestack geostatistical inversion; reservoir prediction

收稿日期:2018-03-06。

作者简介:赵约翰(1982—),男,河北唐山人,副研究员,从事油气勘探方面的研究工作。联系电话:13561025152, E-mail: zhaoyh447@sohu.com。

三角洲滑塌浊积体是胜利油区重要的勘探对象,但是该类沉积体通常伴随大量灰质泥岩发育,导致对砂体展布规律的描述不准确,在井位部署过程中,失利井较多,极大地制约了油气勘探的进展和储量的升级。前人对这类沉积体的研究多停留在定性描述和推理阶段,采用特征测井曲线重构的拟声波反演方法直接预测,缺少对灰质泥岩形成的物理机制分析和地质模式的解剖及灰质泥岩与砂岩的岩石物理参数差异性分析,使得灰质泥岩干扰背景下砂岩储层的预测精度较低。为此,从灰质泥岩微观特征研究出发,分析岩性识别标志,划分不同岩性组合模式,构建静态地质模型,明确不同体系域内灰质泥岩等复杂岩性共生的沉积规律。

在对不同岩相组合地震反射特征定性、定量分析的基础上,结合静态地质模型,开发基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术,将地质模型构建得到的砂岩岩性组合平面分布规律作为地震属性之一加入波形分类过程中,从地质角度对模型道进行监督,有效提高相带区分度。厘清复杂岩相组合的有利相带平面分布规律;应用权值法相建模方法,以地质模型监督的波形分类结果为沉积相模型,通过合理的地层、构造骨架模型建立井内插岩相模型,保证在有井控制的区域与井吻合,在无井控制的区域以沉积相模式为指导开发了叠前地质统计学反演方法,精细刻画灰质泥岩发育区砂岩储层的空间展布规律,实现灰质泥岩发育区砂岩薄储层的准确预测。

1 地质模型构建

1.1 灰质泥岩发育区岩石学特征

以碳酸盐矿物含量、粘土矿物含量和长英质陆源碎屑含量为三端元,分析认为东营凹陷主要发育砂质泥岩、泥质砂岩、灰质泥岩、灰岩、泥质灰岩和砂质灰岩等。其中,砂质泥岩中粘土矿物含量达50%,长英质陆源碎屑含量为31%,碳酸盐矿物含量为14%,黄铁矿含量较高,为4%;内部构造较复杂,纹层状、层状和块状构造均发育,以层状和块状构造为主。泥质砂岩在研究区发育较少,粘土矿物含量明显较少,为27%,长英质陆源碎屑含量高达55%,碳酸盐矿物含量为14%;内部构造以块状构造为主。灰质泥岩在研究区发育较少,粘土矿物含量较高,达55%,长英质陆源碎屑含量为16%,碳酸盐矿物含量较高,达25%;内部构造较复杂,纹层状、层状和块状构造均发育。灰岩粒度较细,为细粒沉

积岩;粘土矿物、长英质陆源碎屑含量均较低,碳酸盐矿物含量达81%,多为隐晶质颗粒;内部构造以纹层状、层状构造为主。泥质灰岩中粘土矿物含量为23%,长英质陆源碎屑含量为16%,碳酸盐矿物含量最高达58%;内部构造发育纹层状和层状构造。砂质灰岩在研究区发育较普遍,粘土矿物含量少,长英质陆源碎屑含量为26%,碳酸盐矿物含量高达59%;内部构造以层状构造为主。

为解决灰质泥岩与砂岩难以区分的问题,采用XRF微量元素测量和X衍射全岩矿物分析等方法更精准地判断其矿物成分。其中,XRF微量元素测量的方法具有不破坏样品、连续测量、方便快捷及对样品的形状规则要求低等特点,不少专家学者利用其来研究现代湖泊沉积,也有学者对XRF与常规的ICP-AES微量元素测量进行对比,表明二者具有正相关性^[1]。综合利用岩心描述、放大镜观察、薄片鉴定、X衍射全岩矿物分析和XRF微量元素测量等手段将东营凹陷灰质泥岩发育区沉积岩划分为碳酸盐岩、泥岩、中含钙灰质泥岩、灰质-砂质泥岩和高含钙灰质泥岩5种岩相类型。

1.2 不同岩性组合的地震反射特征

灰质成分的测井响应特征及地震反射特征的识别是目前研究的热点之一^[2-3]。通常,不同岩石类型的速度和密度存在差异,砂岩和灰质泥岩速度相近,泥岩最低^[4]。根据东营凹陷胜坨地区沙三段下亚段重点井岩性的变化特征,在5种岩相类型的基础上设计了泥岩与灰质泥岩互层、灰质泥岩夹泥岩、泥岩夹灰质泥岩、砂岩夹泥岩、砂岩与泥岩互层、泥岩夹砂岩、砂岩夹灰质泥岩、砂岩与灰质泥岩互层、灰质泥岩夹砂岩等9种岩性组合的正演模型(图1)。砂岩与泥岩互层的地震反射特征和砂岩与灰质泥岩互层的地震反射特征相似,均在其顶界面产生较强的单个波峰反射^[5]。在这2种岩性组合中,中间有厚层灰质泥岩或者厚层砂岩沉积时,其速度差异会导致地震反射变弱;以厚层灰质泥岩为主的灰质泥岩夹砂岩或者是灰质泥岩夹泥岩组合时,在其顶界面也产生较强的单个波峰反射;当岩性组合为厚层砂岩夹薄层灰质泥岩时,在其顶界面会产生多个地震反射强度相似的波峰,这种岩性组合正是勘探过程中寻找的优质岩性组合;当岩性组合为厚层泥岩夹薄层灰质泥岩时,在其顶界面产生强反射而内部产生相对较弱的复波反射,这种岩性组合是勘探中应避免的^[6]。当岩性厚度及组合发生变化时,也可能会表现出相似的地震反射特征,因此仅靠地震资料很难准确识别地下目标岩性体^[7]。

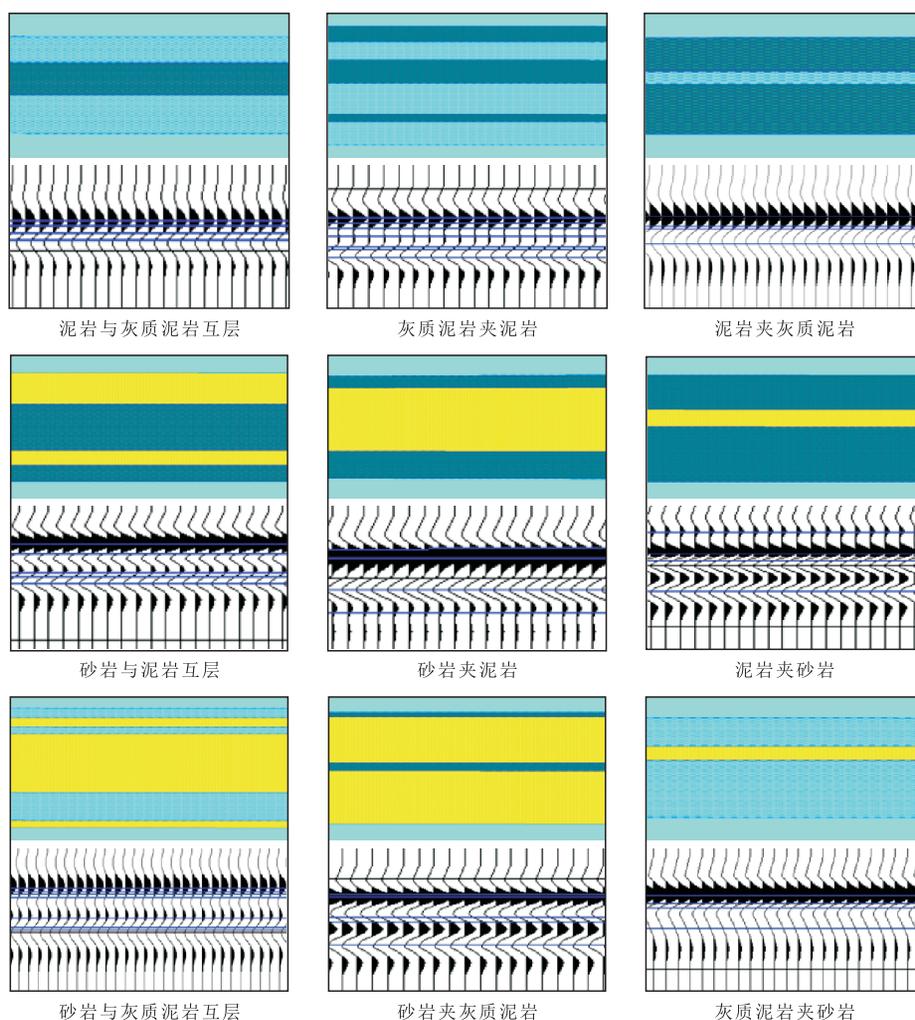


图1 不同岩性组合正演模型

Fig.1 Forward models of different lithology combinations

为进一步明确在灰质泥岩发育区不同岩性组合内部的地震反射结构,对研究区重点井连井剖面的主要岩性组合的振幅和频率进行定量统计(表1)发现,振幅跨度均较大,这与低位体系域内细粒沉积物灰质泥岩中的砂质条带发育有关。以砂岩为主的岩性组合中不含灰质泥岩的地震反射特征为中频、中等—强振幅,含有灰质泥岩的为中频、低振幅;以灰质泥岩为主的为中频、中等—强振幅;以泥岩为主夹砂岩的为中频、中等振幅,夹灰质泥岩的

为中频、弱—强振幅;在泥岩夹灰质泥岩的岩性组合中,振幅主要与二者的砂质含量有关^[8]。

1.3 不同岩性组合的地质模型构建

根据灰质泥岩发育区不同岩性组合地震内部反射结构和外部几何形态特征,分析不同岩性组合的沉积背景及发育部位,构建研究区灰质泥岩发育区不同岩性组合的地质模型(图2)。结果表明:西部扇体发育区靠近断层边缘主要发育砂岩与泥岩互层、泥岩夹砂岩、泥岩夹灰质泥岩3种岩性组合,

表1 不同岩性组合地震反射特征统计

Table1 Seismic response characteristics of different lithology combinations

主要岩性	岩性组合	不同岩性所占比例	频率/Hz	振幅
砂岩	砂岩与泥岩互层	砂岩、泥岩含量均为50%	25~30	4 000~6 000
	砂岩	砂岩含量大于80%	20~30	3 500~7 000
	砂岩与灰质泥岩互层	砂岩、灰质泥岩含量均为50%	20~25	2 000~3 000
	砂岩夹灰质泥岩	砂岩含量为50%~80%,灰质泥岩含量小于50%	20~30	1 800~2 500
灰质泥岩	灰质泥岩夹泥岩	灰质泥岩含量为50%~60%,泥岩含量小于50%	20~30	2 000~7 000
泥岩	泥岩夹砂岩	泥岩含量为50%~80%,砂岩含量小于50%	15~25	3 000~4 000
	泥岩夹灰质泥岩	泥岩含量为50%~80%,灰质泥岩含量小于50%	20~30	1 500~8 000

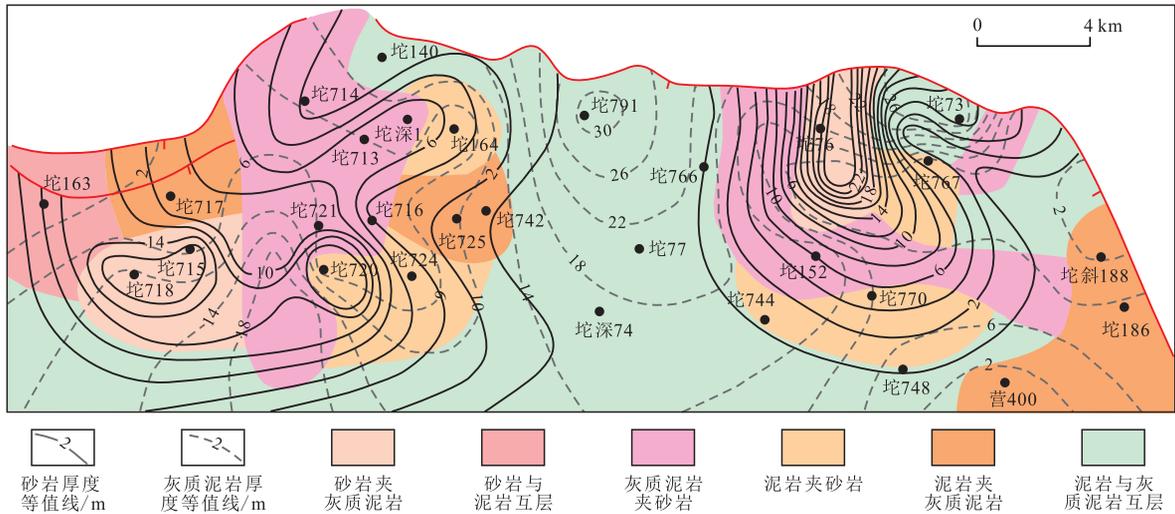


图2 胜坨地区沙三段下亚段低位体系域不同岩性组合地质模型

Fig.2 Geological model of different lithology combinations at lowstand systems tract in the lower third member of Shahejie Formation in Shengtu area

坨718与坨715井区局部发育砂岩夹灰质泥岩,扇端发育泥岩夹砂岩和泥岩夹灰质泥岩;东部扇体发育区断层附近主要发育砂岩与泥岩互层、灰质泥岩夹泥岩、灰质泥岩夹砂岩,扇端发育泥岩夹砂岩,营400与坨斜188井区发育泥岩夹灰质泥岩为主,研究区其余部位发育以泥岩与灰质泥岩互层为主的岩性组合。

2 基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术

在灰质泥岩发育区砂岩储层和灰质泥岩在部分岩性组合中的地震反射特征具有明显差异。地震波形的总体变化是地震波振幅、频率和相位信息的综合反映^[9]。由理论模型和实际地质模型模拟结果可以看出,振幅和频率属性对灰质泥岩与砂岩为主的岩性组合具有一定区分作用。因此开发了基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术,对东营凹陷胜坨地区灰质泥岩发育区的砂岩储层分布规律进行研究。

常规地震波形分类技术利用地震资料信息丰富的特点,采用神经网络算法刻画地震道形状,通过对地震道进行对比分类,刻画地震信号的横向变化,从而用于储层描述或者沉积相划分,这种方法的本质只是一种聚类结果,并不能真实反映地震相带变化规律,因此通常跟实际地质认识偏差较大,很难准确地描述岩相变化规律^[10]。为此,利用不同岩性组合地震内部反射结构与外部几何形态存在的差异,以灰质泥岩发育区地质模型为监督,参与

神经网络波形分类,以实现真正意义上的地震相指示,准确反映地震相带的变化规律。

2.1 基本原理

波形分类是利用神经网络技术对地震波形进行分类处理,根据地震道的波形特征,对某一时窗范围内的地震数据逐道进行对比,细致刻画地震波形的横向变化,从而得到地震异常体的平面分布规律,利用神经网络技术对实际地震道进行训练,模拟人脑思维方式识别不同目标的波形特征,并与其他相似的波形进行对比和判别。首先经过神经网络算法多次迭代合成地震道,然后将合成地震道与实际地震数据进行对比,通过自适应试验和误差处理,改变合成地震道,使合成地震道与实际地震道的相关性更好。根据波形分类结果形成离散的地震相^[11],对其进行平面归类处理,落实平面地震相展布规律。通过已知钻井地质信息标定,对波形分类结果进行综合地质解释,最终得出与地震异常体平面分布规律相对应的地震相展布规律。该方法可以克服常规“相面”法所带来的主观随意性,实现地震相研究的半量化^[12]。

2.2 技术关键

基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术(图3)的关键在于地质模型监督。优选能够反映砂岩岩性组合的振幅、频率和复地震道等多种属性参与训练,更多地反映分类单元储层信息^[13]。在多种属性合理提取的基础上加入地质模型监督。而波形分类结果强烈依赖于地质概念模型或者沉积微相的空间展布特征^[14],尤其是平面分布特征。因此,在建立训练组的过程中,将已构建的灰

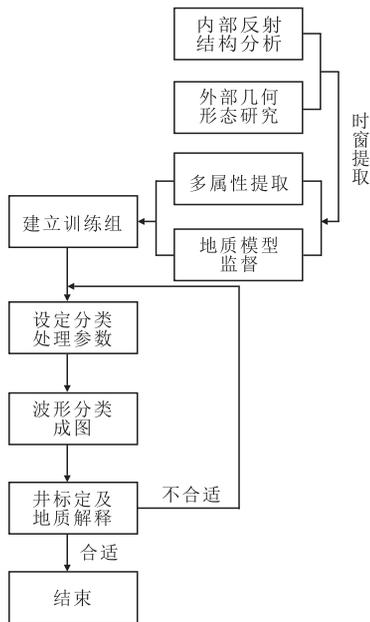


图3 基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术流程

Fig.3 Technical flow chart of multi-attribute neural network waveform classification constrained by geological models

质泥岩发育区不同岩性组合的平面分布规律作为地震属性之一,全程参与分类,这有助于从地质的角度对模型道进行约束,促进概念模型向定量模型的转化,从而明确反演灰质泥岩发育区砂岩储层的展布规律。

2.3 实例分析

以东营凹陷胜坨地区多口已钻井的精细地震标定为前提,在灰质泥岩发育区不同岩性组合的地质模型监督下,完成胜坨地区沙三段下亚段低位体系域的神经网络波形分类(图4)。结果表明,研究区主要发育砂岩夹灰质泥岩、砂岩夹泥岩、灰质泥岩夹泥岩、灰质泥岩夹砂岩、泥岩与灰质泥岩互层5个岩相带,其中砂岩较发育的岩相区主要为黄色、橙色等近物源区域。根据与已钻井、测井资料的对比标定,黄色区域以砂岩夹灰质泥岩、砂岩夹泥岩岩性组合为主,橙色区域以砂岩夹泥岩、砂岩夹灰质泥岩岩性组合为主,浅蓝色和蓝色区域是以灰质泥岩夹泥岩、泥岩与灰质泥岩互层、灰质泥岩夹砂岩等岩性组合为主的混合岩相带。

位于研究区东部的坨76井区靠近物源通道,在断层下降盘近物源区域砂岩储层较发育,储集物性好,含油性也好,随着扇体的推进,在扇体边缘及湖盆中部灰质泥岩发育,位于在扇体边缘的坨152、坨770和坨767井区岩相发生变化,由含砂质较多的黄色、橘色区域变化为灰质泥岩较多的蓝色、淡蓝色区域(图4)。这与前人的认识一致。

位于研究区西部的坨715和坨720井区既有胜坨大断层北部提供的物源,又有来自西北部提供的物源注入,在平面上扇体规模较东部扇体规模大,

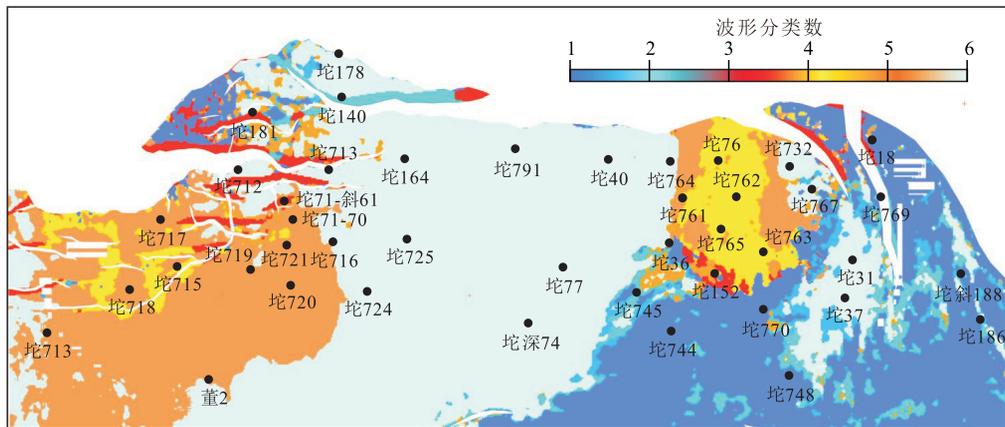


图4 胜坨地区沙三段下亚段低位体系域地质模型监督的神经网络波形分类

Fig.4 Neural network waveform classification constrained by geological models of the lowstand systems tract in the lower third member of Shahejie Formation in Shengtuo area

延伸距离远(图4)。扇体中心发育在坨720井区,向南推进到董2井区,相带发生变化,灰质泥岩增多,这与实际钻井情况吻合。

通过地质模型的监督约束,有效提高了复杂岩性区的相带区分度,尤其是实现灰质泥岩发育区波形不是一一对应情况下的岩相划分,较常规预测方法大大提高有利相带预测的准确性。

3 地质模型监督的叠前地质统计学反演方法

利用基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类技术,可有效预测低位体系域灰质泥岩发育区砂岩储层的有利相带,但仍达不到勘探部署的精

度需求。前人对灰质泥岩发育区砂层组的研究多停留在定性描述和推理阶段,多采用特征测井曲线重构的拟声波反演方法^[15]。但是利用这种常规反演方法仅靠通过地震资料精细刻画非均质性很强的灰质泥岩和砂岩是非常困难的,这也严重影响了对砂岩储层分布规律的描述。为此,进一步研究灰质泥岩发育区目标砂层组的精细描述技术。基于叠前地震资料,开发将叠前确定性反演方法和随机反演方法相结合的叠前地质统计学反演方法,在反演过程中进行地质模型约束,不仅能解决储层与围岩阻抗叠置情况下有效储层难以识别的问题,而且可提高纵向分辨率和描述准确度。

3.1 基本原理

叠前地质统计学方法是将地震、岩相、测井、概率分布函数和变差函数等信息结合,建立地质框架模型和岩石物理模板。首先,对井资料和地质信息进行分析,获得概率分布函数和变差函数,其中概率分布函数描述的是特定岩性对应的岩石物理参数分布的可能性,而变差函数描述的是横向和纵向地质特征的结构和特征尺度;其次,利用马尔科夫链蒙特卡洛算法,根据概率分布函数^[16]得到纵横波速度比等弹性参数体;最后,通过反复迭代计算,保证最终的岩性模拟所对应的合成地震记录与实际的叠加地震数据具有较高的相似性,从而实现对岩性油气藏的描述。

3.2 技术关键

尽管叠前地质统计学技术较为先进,但是在实际应用中仍然存在诸多不足。一是多数研究人员没有从算法本身的原理与条件出发,在缺乏分析研究区的适用范围和条件的情况下就直接将测井数据或其他资料输入计算机进行约束反演,造成了反演结果与地质认识存在较大差异。二是因为统计学技术本身的不确定性,造成千人反演千种结果,甚至是一人反演多种结果的现象。实质上,地质统计学技术的应用效果明显受控于地质概念模型或沉积(微)相的空间展布特征,尤其是平面分布特征;而假设的随机函数模型、数据量及约束方法均影响最终效果^[17]。为此,在利用叠前地质统计学技术进行反演的过程中,全程应用权值法相建模方法,以沉积相模式为基础,通过合理的地层模型、构造模型和沉积相模型进行储层三维信息定量表征。在相建模过程中考虑每口重点井所处的相带,而相带取决于地质模型所建立的神经网络波形分类图,通过分析每口井的相带位置及储层发育规律,在建模空间插值的过程中进行权重分配,合理

分布区间,并以此作为约束条件进行叠前地质统计学反演。这有助于从地质模型角度对地震模型进行约束,促进概念模型向定量模型的转化,降低地质统计学反演结果的不确定性,从而得到合理反映地下储层发育特征的反演结果。

3.3 目标砂层组储层精细描述

通过对研究区地质模型约束的叠前地质统计学反演方法得到剔除灰质泥岩影响的纵横波速度比数据体,由图5可以看出,坨719井在沙四段上亚段1砂组发育厚度为46 m的细砾岩,坨720井在沙三段下亚段底部发育厚度为20 m的中砾岩、在沙四段上亚段1砂组发育厚度为7 m的中砾岩。据此,对沙三段下亚段重点砂层组3砂组、5砂组和6砂组的砂体空间展布特征进行追踪,结果表明,砂体沿物源方向在胜北断层下降盘较发育,研究区西部储层厚度中心分布在坨720井区,东部储层厚度中心分布在坨76井区(图5),这与前人的地质认识完全一致。

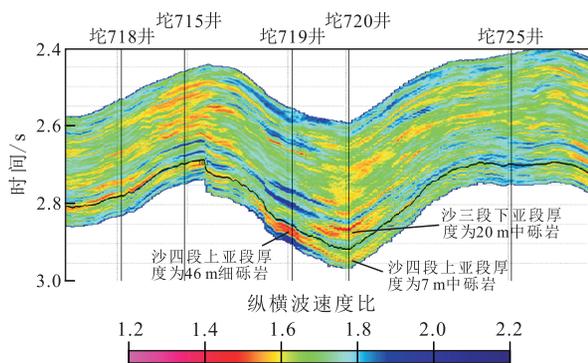


图5 胜坨地区坨718井—坨725井近东西向纵横波速度比剖面

Fig.5 V_p/V_s section approximately from east to west crossing Wells Tuo718–Tuo725 in Shengtuo area

由图6可以看出,研究区东部砂体越过断层下降盘,推进到坨770井区附近,西部砂体推进到董2井区附近。坨76扇体沿北部物源向南推进,5砂组砂体发育规模明显较6砂组大,6砂组分为上、下2套,在平面上的展布特征不同,整体看来,古冲沟中心即是储层发育的主要部位,储层在断层下降盘发育较厚,向前逐渐减薄。

地质模型约束的叠前地质统计学反演结果具有较高的纵向分辨率,5 m左右砂体均能清晰识别,而且与测井解释结果及地质认识吻合程度高,尤其在对薄储层、泥岩与砂岩互层、砂岩与灰质泥岩互层及孤立砂体精细刻画方面,具有非常独特的优势。

在对东营凹陷胜坨地区地质综合研究的基础上,在地质模型监督的神经网络波形分类预测有利相带与地质模型约束的叠前地质统计学反演所精

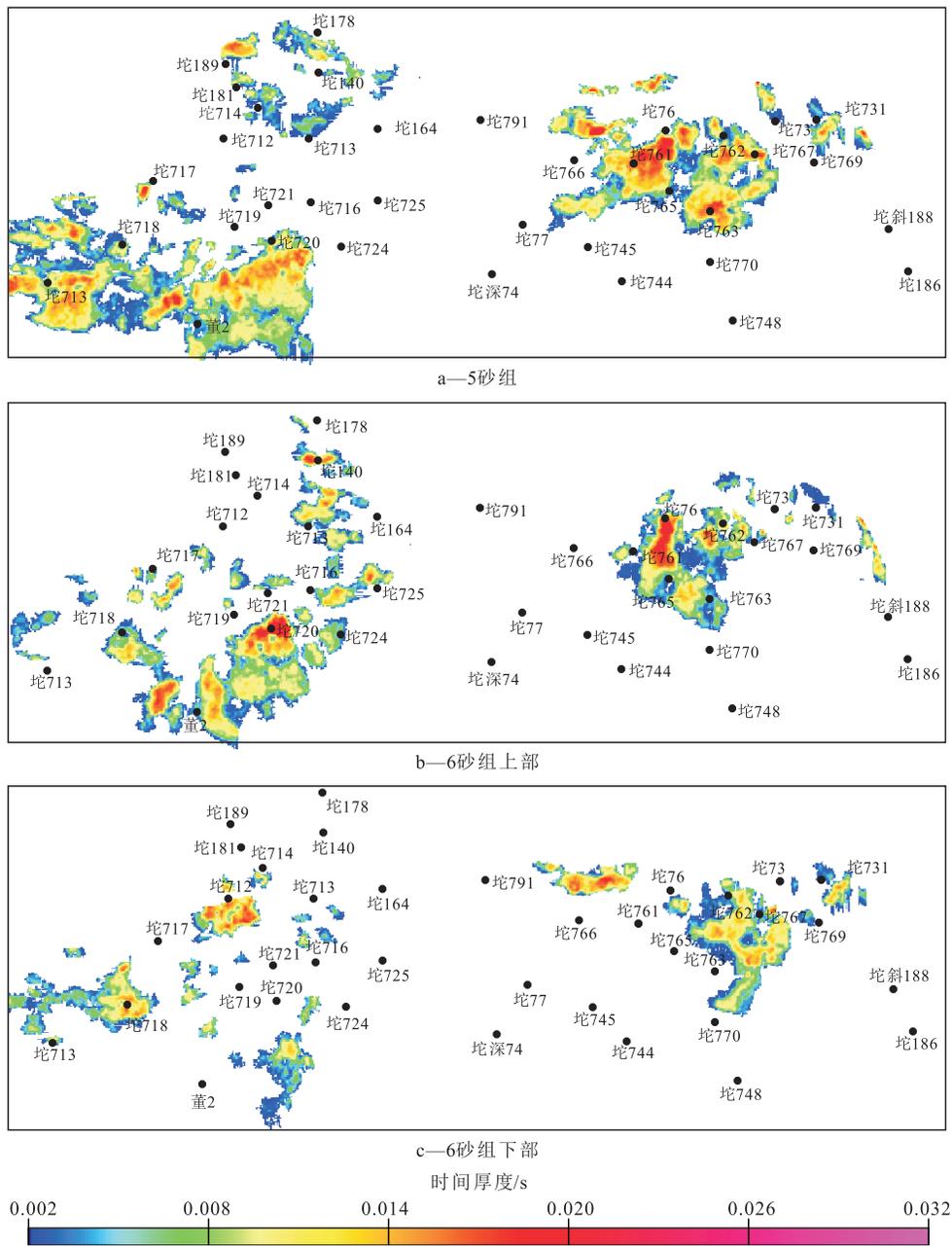


图6 胜坨地区胜北断层下降盘沙三段下亚段5,6砂组砂体时间厚度平面展布

Fig.6 Plane distribution(time thickness)of sand bodies in 5th and 6th sand groups of the lower third member of Shahejie Formation at the downthrown side of Shengbei Fault in Shengtuo area

细描述的砂岩储层的综合指导下,在断层下降盘部署了坨71-斜61与坨71-70井(图4)。其中坨71-斜61井在目的层钻遇2层总厚度为12 m的油层,坨71-70井在目的层钻遇8.7 m的含砾砂岩,实钻结果与预测结果一致。这2口井的钻探证实了基于地质模型监督的灰质泥岩发育区砂岩储层预测方法的可靠性。

4 结论

综合利用岩心描述、放大镜观察、薄片鉴定、X

衍射全岩矿物分析和XRF微量元素测量等方法,将东营凹陷灰质泥岩发育区沉积岩划分为碳酸盐岩、泥岩、中含钙灰质泥岩、灰质-砂质泥岩和高含钙灰质泥岩5种岩相类型,解决灰质泥岩与砂岩难以区分的问题。通过对灰质泥岩发育区9种不同岩性组合的正演模拟研究,在明确不同岩性组合内部地震反射特征与外部几何形态的基础上,构建灰质泥岩发育区复杂岩性地质模型。

利用基于地质模型监督的多属性神经网络波形分类方法将地震反射特征刻画出来,在地震地质综合研究构建的地质模型约束下,利用相控波形分

类技术预测灰质泥岩发育区砂岩储层有利相带。利用地质模型约束的叠前地质统计学反演方法促进概念模型向定量模型的转化,精细刻画灰质泥岩发育区目标砂层组储层空间展布规律。在胜坨地区建立了静态模型约束的灰质泥岩发育区砂岩储层预测方法,取得了较好勘探效果。

参考文献:

- [1] 成艾颖,余俊清,高春亮,等.湖泊沉积物微量元素 ICP-AES 与 XRF 分析方法和相关性研究[J].光谱学与光谱分析报,2013,33(7):1 949-1 952.
CHENG Aiyong, YU Junqing, GAO Chunliang, et al. Study on trace elements of lake sediments by ICP-AES and XRF core scanning[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1 949-1 952.
- [2] 刘惠民,孙善勇,操应长,等.东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相特征及其分布模式[J].油气地质与采收率,2017,24(1):1-10.
LIU Huimin, SUN Shanyong, CAO Yingchang, et al. Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the lower E₃ member, Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 1-10.
- [3] 刘金连,张建宁.济阳探区单一河道砂体边界地质建模及其地震正演响应特征分析[J].石油物探,2010,49(4):344-350.
LIU Jinlian, ZHANG Jianning. Geological modeling and seismic forward response characteristics analysis of single channel sand body boundary in Jiyang prospecting area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 344-350.
- [4] 王敏,朱家俊,余光华,等.罗家地区泥页岩岩相特征及测井分析技术[J].测井技术,2013,37(4):426-431.
WANG Min, ZHU Jiajun, YU Guanghua, et al. The shale lithofacies characteristics and logging analysis techniques in Luoia area [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 426-431.
- [5] 王大伟,刘震,赵伟,等.砂泥岩互层油藏时移地震差异波形特征[J].地质科技情报,2007,26(4):107-110.
WANG Dawei, LIU Zhen, ZHAO Wei, et al. Characteristics of time-lapse seismic waveform for sand-mud interbed [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(4): 107-110.
- [6] 凌云研究组.测井与地震信息标定研究[J].石油地球物理勘探,2004,39(1):68-74.
LING Yun. Study of logging and seismic information labeling [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(1): 68-74.
- [7] 王宏宇,樊太亮,肖莹莹,等.凝灰质成分对砂岩储集性能的影响[J].石油学报,2010,31(3):432-439.
WANG Hongyu, FAN Tailiang, XIAO Yingying, et al. Effect of tuffaceous components on physical property of sandstone reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 432-439.
- [8] 王延光,柴振一,李明娟.胜利油田胜海地区馆陶组上段油气藏勘探中的地震方法研究与应用[J].石油勘探与开发,2000,27(6):70-73.
WANG Yanguang, CHAI Zhengyi, LI Mingjuan. The study and application of the seismic methods in oil and gas exploration in Upper Guantao Formation of Shenghai area [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(6): 70-73.
- [9] 凌云研究组.储层演化地震分析[J].石油地球物理勘探,2004,39(6):672-678.
LING Yun. Seismic analysis of reservoir evolution [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(6): 672-678.
- [10] 邓传伟,李莉华,金银姬,等.波形分类技术在储层沉积微相预测中的应用[J].石油物探,2008,47(3):262-265.
DENG Chuanwei, LI Lihua, JIN Yinji, et al. Application of seismic waveform classification in predicting sedimentary microfacies [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(3): 262-265.
- [11] 徐黔辉,姜培海,沈亮. Stratimagic 地震相分析软件在 BZ25-1 构造的应用[J].中国海上油气:地质,2001,15(6):55-60.
XU Qianhui, JIANG Peihai, SHEN Liang. A preliminary application of stratimagic seismic facies analysis software to BZ25-1 structure [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2001, 15(6): 55-60.
- [12] 赵力民,郎晓玲,金凤鸣,等.波形分类技术在隐蔽油藏预测中的应用[J].石油勘探与开发,2001,28(6):53-55.
ZHAO Limin, LANG Xiaoling, JIN Fengming, et al. Application of waveform classification technique in the prediction of subtle reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 53-55.
- [13] 赵力民,彭苏萍,郎晓玲,等.利用 Stratimagic 波形研究冀中探区大王庄地区岩性油藏[J].石油学报,2002,23(4):33-36.
ZHAO Limin, PENG Suping, LANG Xiaoling, et al. Application of stratimagic waveform classification technique to the research of lithologic oil reservoir in Dawangzhuang area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 33-36.
- [14] 张勇,宋维琪.基于储集层地质模式用多种地震属性参数预测砂体含油气性[J].石油勘探与开发,2001,28(4):60-63.
ZHANG Yong, SONG Weiqi. Predicting the oil/gas bearing potential of sand bodies with various seismic attribute parameters based on geological model of the reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(4): 60-63.
- [15] TORRES-Verdin C, VICTORIA M, MERLETTI G, et al. Trace-based and geostatistical inversion of 3-D seismic data for thin-sand delineation, an application in San Jorge Basin, Argentina [J]. The Leading Edge, 1999, 18(9): 1 070-1 076.
- [16] 陈昌.兴隆台构造带沙河街组三段浊积岩优质储层叠前地震预测[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):144-149.
CHEN Chang. Pre-stack seismic prediction of the high-quality turbidite reservoir in E₃ of Xinglongtai Structural Belt [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 144-149.
- [17] 杨丽兵,张虹,谯述蓉,等.随机地震反演在川西坳陷 DY 构造储层预测中的应用[J].石油物探,2010,49(4):373-379.
YANG Libing, ZANG Hong, QIAO Shurong, et al. Application of stochastic seismic inversion on reservoir prediction of DY structure in Western Sichuan Depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 373-379.