

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.019

银额盆地哈日凹陷灰质泥岩气藏识别技术

白晓寅¹, 贺永红¹, 韩小锋^{2,*}, 任来义¹, 马芳侠¹, 韩长春¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:哈日凹陷位于银根-额济纳旗盆地北部, 勘探程度较低, 目前, 主要勘探对象为灰质泥岩、白云质泥岩等非常规油气藏, 但由于该凹陷属于小型复杂断陷贫瘠沉积, 岩性复杂多样, 主要目的层岩性横向变化快、纵向跨度大, 薄砂层、白云质泥岩、灰质泥岩等多种岩性可区分度低, 常规预测手段识别困难。为了解决上述难题, 通过反复对比试验, 确定了以保护低频信息的宽频地震采集和保真保幅三维处理数据为基础, 通过井震联合地震相识别技术和虚切片技术建立立体的地震-沉积相模型, 在严格的立体“相”边界控制下, 采用多属性优化技术及基于拟声波曲线重构的相控分频属性反演等具有针对性的灰质泥岩气藏识别技术, 有效提高了灰质泥岩储层“甜点”识别的精度, 形成了简单、有效、经济的小型复杂断陷盆地灰质泥岩气藏识别技术系列。最终在哈日凹陷巴音戈壁组识别泥岩气藏面积达 128 km², 综合评价优选上钻的多口井位均在目的层获得较好的页岩气勘探效果。证明了上述基于宽频保真保幅地震数据的复杂断陷泥岩油气藏识别技术的有效性和实用性。

关键词:银额盆地; 宽频地震数据; 灰质泥岩气藏; 哈日凹陷; 识别技术

中图分类号: TE122

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)02-0270-10

Identification Technology of Grey Mudstone Gas Reservoir in Hari Sag of Yin'e Basin

BAI Xiaoyin¹, HE Yonghong¹, HAN Xiaofeng^{2,*}, REN Laiyi¹, MA Fangxia¹, HAN Changchun¹

(1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. LTD, Xi'an 710075, Shaanxi, China;

2. Xi'an center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Hari sag is located in the northern part of the Yingen-Ejinaqi Basin. The exploration level is relatively low. At present, the main exploration targets are such unconventional oil-and-gas reservoirs as grey mudstone and dolomitic mudstone. The sag belongs to the small and complex fault depression and its lithology is complex and diverse. The lithology of the target layer changes rapidly and the longitudinal span is large. Many lithologies, as thin sand layer, dolomitic mudstone and grey mudstone, are difficult to identify with conventional prediction methods. In order to solve the above problems, through repeated trials and tests, broadband seismic data

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-12-05

基金项目: 延长石油(集团)有限责任公司 2015 年科技攻关项目“银额盆地(延长探区)基本石油地质特征研究与勘探方向分析”(ycsy2015ky-A-06)

作者简介: 白晓寅(1982-), 男, 高级工程师, 2008 年毕业于中国石油大学(华东), 主要从事油气勘探技术应用及研发。E-mail: 95622111@qq.com

* 通讯作者: 韩小锋(1982-), 男, 工程师, 主要从事油气资源勘查工作。E-mail: hxiaofeng@mail.cgs.gov.cn

acquisition and processing is used. A three-dimensional seismic-sedimentary-facies model is established through the technology of well seismic identification and virtual slice analysis. The optimization technology under strict three-dimensional “phase” -boundary control and the inversion, based on pseudo-acoustic curve reconstruction, of phase-controlled frequency division are adopted. These technologies have effectively improved the accuracy of identification of grey mudstone reservoirs. Thus, a simple, effective and economical identification system for small-scale, complex-filled-basin grey mudstone gas reservoirs has been formed. Consequently an area of 128 square kilometers of grey mudstone gas reservoirs has been identified in the Bayinggebi Formation of Hari sag. The wells drilled have achieved better results of shale gas exploration in the target layer. It has been proved that the identification technology for complex fractured shale gas reservoirs based on broadband seismic data is valid and practical.

Keywords: Yin’ e Basin, Broadband seismic data, Grey mudstone gas reservoir, Hari sag, Identification technology

1 概况

银根-额济纳旗盆地(银额盆地)位于华北、西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木 4 个板块的结合部位(钟福平, 2014; 刘春燕, 2006; 王香增, 2016; 余琪祥, 2016)。这 4 个大地构造单元具有截然不同的构造性质, 形成了银额盆地复杂多变的地质构造背景(陈启林, 2006; 董洪凯, 2018)。地理位置位于内蒙古西

部与甘肃省结合部位, 东以狼山为界, 西邻北山, 南抵北大山和雅布赖山, 北至中蒙边境及洪格尔吉山、蒙根乌拉山; 地理坐标为东经 98°~108°, 北纬 39°至中蒙边境。该盆地勘探程度较低, 地层、构造格架尚不明确, 是目前中国大陆仅剩的低勘探程度大型含油气盆地。哈日凹陷位于银额盆地中北部, 是苏红图坳陷的一个次级构造单元(白晓寅, 2017), 属于中生界形成的小型凹陷(图 1)。

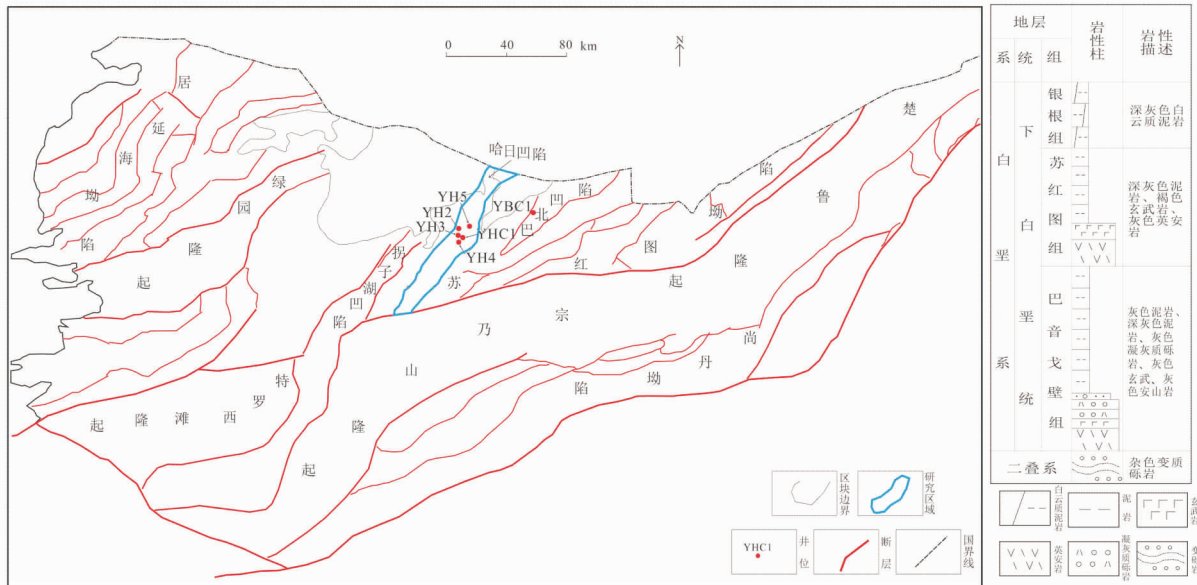


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of research region

该凹陷首口探井 YHC1 井 2015 年在白垩纪巴音戈壁组的灰质泥岩中试气获得高产工业气流,无阻流量日产达 $9.15 \times 10^4 \text{ m}^3$,被称之为银额盆地油气勘探取得的历史性突破(赵春晨,2017),灰质泥岩油气藏也随之成为该凹陷油气勘探的重点目标。

哈日凹陷属于典型的小型复杂断陷贫瘠沉积,在 YHC1 井巴音戈壁组灰质泥岩油气藏预测中主要存在以下几点问题:①工区中生界为断陷盆地,地层倾角大,断裂复杂,各类特殊岩类发育,地震反射特征不明显。②主要目的层沉积整体以细粒沉积为主,不同岩性、物性之间差异性较小,精细预测难度大。③目标层位巴音戈壁组纵向跨度大,深部和浅部相差千米以上,且同一大类岩性持续发育数百米,薄砂层、白云质泥岩、灰质泥岩等多种岩性受深度、厚度、沉积相带等影响可区分度低,泥岩油气藏“甜点”识别及其困难。对于泥(页)岩油气藏的“甜点”预测技术,国内外均有很多成功的实践,主要采用地震多属性、波阻抗反演、地质统计学反演以及 AVO 分析、矿物脆性因子和弹性参数脆性因子等结合叠前反演预测页岩有机碳含量、成熟度、脆性矿物含量等,在国内外不同盆地取得了较好的应用效果(刘致水,2015;许杰,2019)。

基于上述勘探实际,为了较好的识别灰质泥岩油气藏,通过现场反复试验分析,以宽频地震采集和保

真保幅处理数据为基础,充分发挥宽频地震资料中的多种、多类地震相属性信息,利用井震联合标定以及多属性地震相识别技术,建立起严格的立体地震-沉积相控制边界,采用相控约束的多属性泥岩识别,以及基于拟声波曲线重构的相控分频反演等技术,有效提高了灰质泥岩天然气藏“甜点”识别的精度。

2 宽频地震数据基础

为了满足复杂地质目标高精度的成像需求,解决哈日凹陷中生界下部反射成像分辨率不高,信噪比和局部连续性较差等问题,通过现场反复试验,采用低频大功率可控震源激发(最低激发频率达到 1.5 Hz),5 Hz 低频高灵敏度检波器接收低和与之相匹配的一系列保护低频及保真保幅处理技术,有效提高了深层、内幕反射的成像效果;同时,拓展了信号倍频程、减少子波旁瓣,地震资料的纵向分辨率得到明显提高(张宏,2016;倪宇东,2011;魏国伟,2008;张军华,2016)。从图 2 可以看出,中深层格架界面低频反射明显,成像清晰;陡坡带各种叠瓦状地层产状及接触关系清晰,波组强弱真实;凹陷内部沉积中心呈高频、连续反射,内幕岩性、微幅构造表现明了,是利用低频信息进行相控约束开展储层预测研究的理想资料。

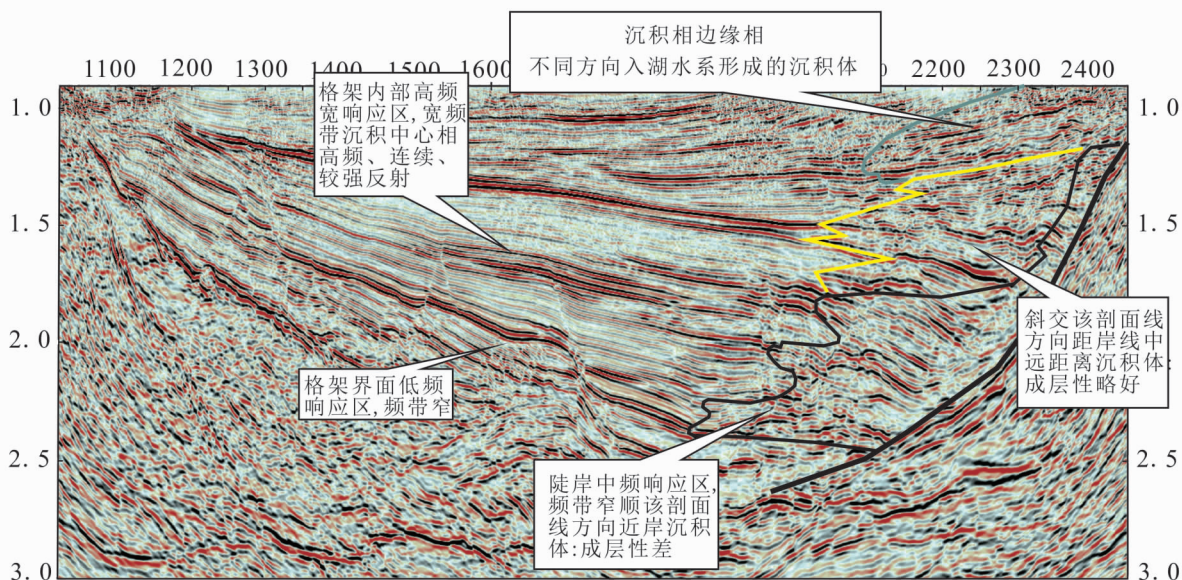


图 2 经过低频保护措施偏移后叠加剖面图

Fig. 2 Superimposed profile after offset by low frequency protection

3 灰质泥岩气藏识别关键技术

3.1 地震-沉积相立体控制边界建立

3.1.1 剖面相控模式建立

本次地震剖面相模式研究主要遵循地震相振幅能量匹配、岩性相单井相为基准、沉积体系与沉积演化相匹配的等原则(刘震,1992;常迈,2006)。虽然不同地震响应特征通常代表着不同成因的储层类型,但往往地震相解释存在不同程度的多解性,因此,需要以取心井为基础,建立单井沉积相,再通过精细标定,建立不同地震相模式分类依据。

哈日凹陷属陆相断陷湖盆沉积类型,地震波的物理特征、几何形态以及剖面反射结构均是陆相湖盆沉积相研究中作为地震相划分的重要依据。其中,物理特征一般指连续性、振幅和频率;几何形态一般指地震反射体的剖面形态,通常包含席状、楔形、丘形、充填等;反射结构多描述地震反射波同相轴的接触结构,主要有平行、亚平行-波状、发散、前积、杂乱、无反射(空白)等。

根据上述识别原则和依据,可以清晰地哈日凹陷识别出多类不同的地震相反射特征。从图3可以看出断陷中部多为平行或亚平行反射,陡坡带多发育楔形沉积构造,底部存在丘状杂乱反射。

在地震相划分基础上,通过精细的单井相划分及井震标定,根据典型地震相的地质内涵及相似沉

积地区地震相与沉积相的匹配关系,建立了区内地震相与沉积相的对应关系(表1)。利用这种关系,结合构造背景,将研究区各类地震相转换为水下扇、扇三角洲、辫状河三角洲、河流、湖泊、火山喷发等沉积相(图4),本次研究的重点灰质泥岩储层主要发育在平行或亚平行反射特征区,属湖相沉积。

3.1.2 平面相控模式建立

平面相边界建立只要依据前面剖面相识别成果在平面的直接投影结合虚切片技术,根据实际地震剖面上下层接触关系,将主要目的层苏宏图组和巴音戈壁组分为50个小的层序。图5是从巴音戈壁组底部到苏宏图组顶部等间距的选取的9个沿层切片,通过切片反应的演化规律精细分析研究区上下沉积规律,结合剖面地震相划分投影,在等间隔沿层切片上划定不同相边界。本次研究中主要在平面上划分出陡坡带、中间洼槽带、缓坡带根部及底部砂砾岩相带等,从而确定平面相控边界。

高精度的立体地震-沉积相划分可以明确各类岩性、储层发育的有效范围边界,有效缩小主要目标灰质泥岩储层的识别范围,起到真正的相控作用,减少识别的多解性。

3.2 相控约束的多属性泥岩识别技术

笔者采用的“相控约束的多属性泥岩识别技术”主要包含2部分内容:一是借助S变换时频分析技术将不同岩性、不同油气显示段的井旁地震数据进行时频域分析,优选出对本次研究目的岩性灰质泥

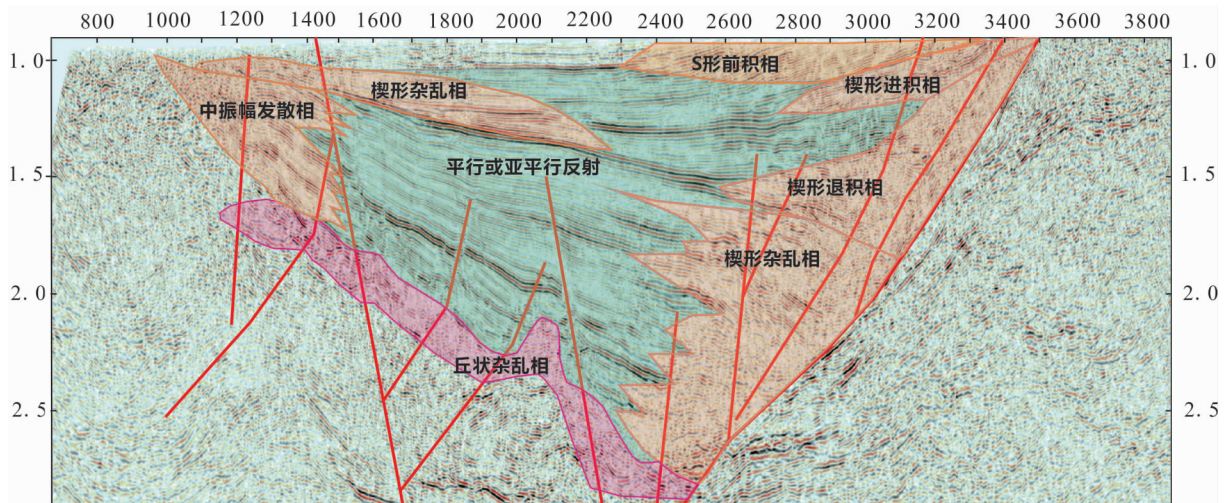


图3 银-额盆地延长探区地震相剖面图

Fig. 3 Sectional view of the seismic facies of the Yanchang exploration area in the Yin'e basin

表1 银额盆地延长探区地震相-沉积相转换模式表

Tab.1 Seismic facies-sedimentary facies conversion model in the Yanchang exploration area of Yin'e basin

区域	地震相类型	地震相特征	沉积相	岩性	泥岩颜色
缓坡区	中、强振幅亚平行地震相	中-强无固定外形,连续,亚平行,席状	滨浅湖	中薄层砂泥岩互层	灰色、浅灰色
	变振幅亚平行地震相	变振幅、亚平行、低连续	扇三角洲	厚层砂砾岩夹泥岩	红色、浅灰色
	变振幅乱岗状地震相	变振幅呈乱岗状反射			
	变振幅低连续亚平行地震相	连续性低、振幅多变,亚平行结构	间歇湖-河流	泥岩夹砂岩	杂色、红色
陡坡区	楔形杂乱地震相	内部杂乱,外形楔状,向凹陷内迅速过渡为连续、评选席状反射	水下扇	中厚层砂岩、砂砾岩夹泥岩	灰色、灰黑色
	帚状前积地震相		变振幅,下倾方向发散		
凹陷区	弱振幅平行连续地震相	弱振幅高连续,亚平行结构	半深湖-深湖	泥岩、灰质泥岩、白云质泥岩	深灰色、灰黑色

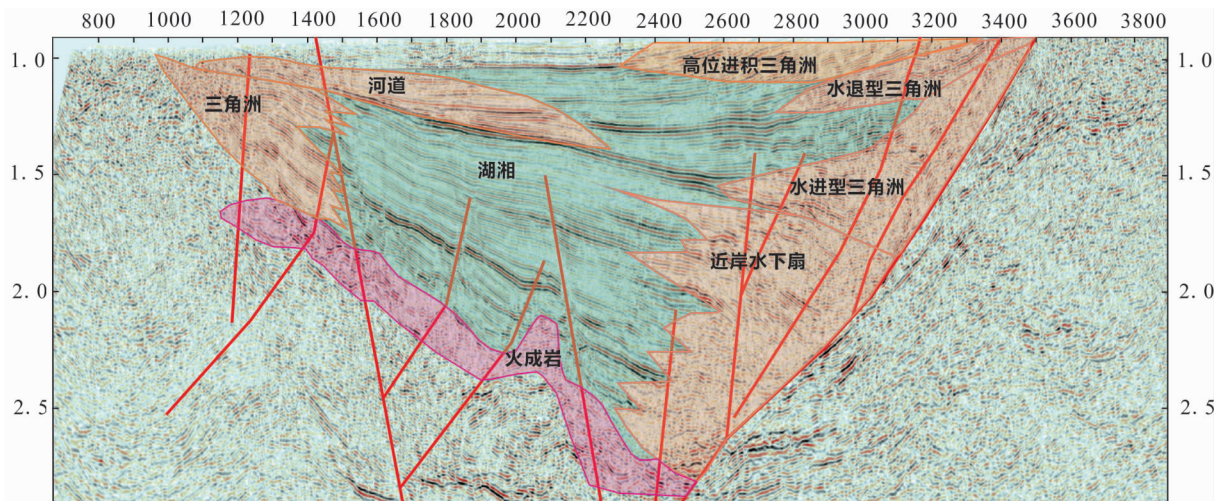


图4 银-额盆地延长探区地震沉积相特征图

Fig.4 Characteristics of seismic sedimentary facies in the Yanchang exploration area of Yin-E basin

岩较为敏感的地震属性;二是采用主成分分析技术,以上述地震相结果作为主要约束条件,优化敏感地震属性,重构新的泥岩敏感地震属性(印兴耀,2005,2008;倪凤田,2008)。

(1)地震属性提取。本次研究的含气灰质泥岩段主要集中在巴音戈壁组二段,叠后波场有效频带范围为3~56 Hz,频带较宽,地震资料所携带的地质信息具有明显的多尺度性,能够反映不同岩性不同油气显示特征。因此,通过精细的井震标定,利用具有较好时频分辨率的S变换将目的层段的井旁道地震数据进行时频分析,从能量、频率、能量变化梯

度等不同方向选取灰质泥岩敏感属性。

(2)相控多属性优化技术。“相控多属性优化技术”主要是采用主成分分析属性优化技术,从众多地震属性中优选出对目标较为敏感的地震属性,然后再与精细识别的地震相综合分析,给予地震相一定程度的权重系数加以约束,最终优选第一主成分作为新属性(倪凤田,2008)。

主成分分析是利用数理统计分析获得各要素间线性关系最为实质的表达式,以若干少数具有代表性的合成变量来表征众多要素的信息集合,从而克服了变量选择时的冗余和相关,然后优选少数信息

“相控多属性优化技术”就是通过上述主成分分析技术对选取的对灰质泥岩气藏较为敏感的属性集进行聚类处理,选取前2个系数比重较大的主成分作为新属性,在通过地震相约束处理,根据数据特点,不同相选用不同的权重系数,最终求得在相控范围内的储层甜点范围(图6)。从多属性优化结果可以看出,YHC1灰质泥岩“甜点”储层发育区域主要以中强值域为主(红偏黄颜色),受沉积和断裂影响平面上呈区带分布。

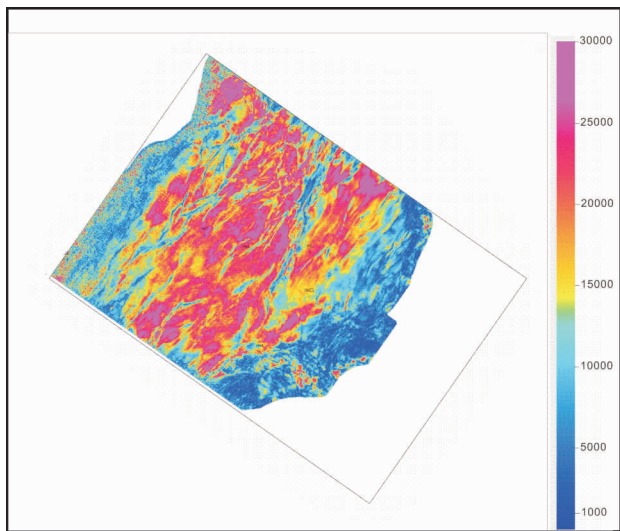


图6 多属性优化结果图

Fig. 6 Multi-attribute optimization results

3.3 拟声波曲线重构与相控分频属性反演

(1)拟声波曲线重构。通过对研究区测井曲线与单井岩性柱状图比较发现,声波时差曲线与岩性对应关系较差,进行波阻抗反演剖面岩性解释时不能简单地利用声波曲线信息。因此,通过反复试验研究,为了能更好的进行岩性识别,引入拟声波阻抗。

笔者拟声波曲线重构是以声波测井曲线为标准,将对灰质泥岩储层相对敏感的伽马测井曲线、电阻率测井曲线等利用信息融合技术投射到同一个表征模型上,新生成的曲线具有声波量纲,称之为拟声波曲线,使其不仅具有声波特性,同时还包含伽马等曲线的高频信息(贺懿,2008)。

拟声波曲线的构建关键是看如何将声波曲线的低频信息和伽马、电阻率等曲线的高频信息有机融合到一起。成功的拟声波曲线应同时具备反映地层

速度和波阻抗变化和细微岩性变化的双重功能,可以实现各种信息的有效控制和有机融合。

由于研究区声波曲线对灰质泥岩储层反映不是很敏感,而GR曲线却能较好的反映该储层的细微变化,所以用GR与DT重构拟声波曲线可以提高岩性的识别能力,更准确的预测储层。

(2)相控分频属性反演。相控分频属性反演是在精细的地震相划分的基础上,通过进行的井震联合二维谱分析,深入研究振幅与频率的变化关系(AVF),建立AVF响应的非线性关系模型,再根据储层精细标定和分频对比分析,合理提取目的层段地震数据的低、中、高频信息,引入AVF响应关系模型进行参数反演,从而得到分辨率较高的反演结果(于建国,2006)。

AVF响应关系最为直观的就是利用一个楔形模型,采用不同主频的雷克子波褶积得到其合成地震剖面,再利用时频分析技术得到振幅与时间厚度在不同频率时的调谐曲线以及在不同时间厚度下振幅随频率变化(AVF)的关系,同一地层在不同的主频频率子波下会展现不同的振幅特征(于建国,2006;白晓寅,2012),这一特征就是分频反演的基础。

分频反演首先对地震资料的目标层段进行精细的频谱分析,尽可能的明确各岩性、储层及含油气位置所对应的频谱范围及频谱特征,从而优选出合适的各敏感频率带,通过分频处理得到反演需要的不同频带地震数据体(白晓寅,2012)。获得分频数据体后,再利用神经网络、支持向量机(SVM)等多种非线性方法计算反复训练获得最佳的振幅与频率(AVF)之间的关系,从而获得拟声波阻抗曲线、低频模型以及不同频带地震数据特征属性之间的非线性映射关系,得到反演结果(于建国,2006;白晓寅,2012)。在分频反演过程中,由于加入AVF关系,有效地提高了反演的分辨率,降低了反演结果的自由度。

笔者采用的相控分频属性反演,选取前面得到的泥岩敏感地震属性,并以地震相识别结果作为低频先验信息加以约束,利用AVF关系,反复训练各属性及迭代权重系数,最终达到较好井-震吻合度。图7为最终的反演结果剖面。可以看出哈日凹陷巴音戈壁组主要以湖相沉积为主,缓坡带发育一些河道、辫状河三角洲扇体,陡坡带以厚套粗粒冲积扇沉

积为主,中央凹陷区发育大套泥岩,其间夹杂薄层细砂岩、粉砂岩沉积。图 8 为常规分频反演与本次相控分频反演巴音戈壁组二段波阻抗结果平面对比图,可以看出,相控反演结果相对于常规反演可以较好的反映出陡坡带和缓坡带根部相对粗相带的沉积规律,使中间洼槽带泥岩发育特征更为清晰,与实际钻井及该区基本沉积认识吻合较好。

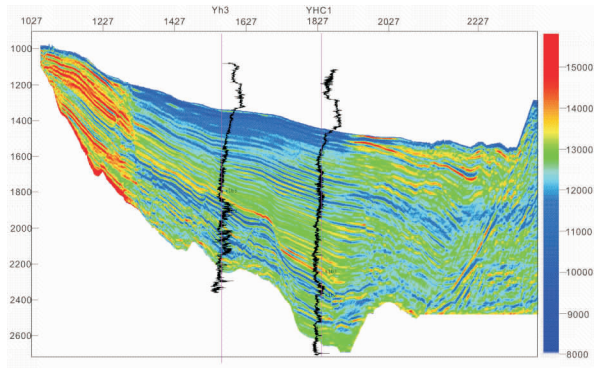


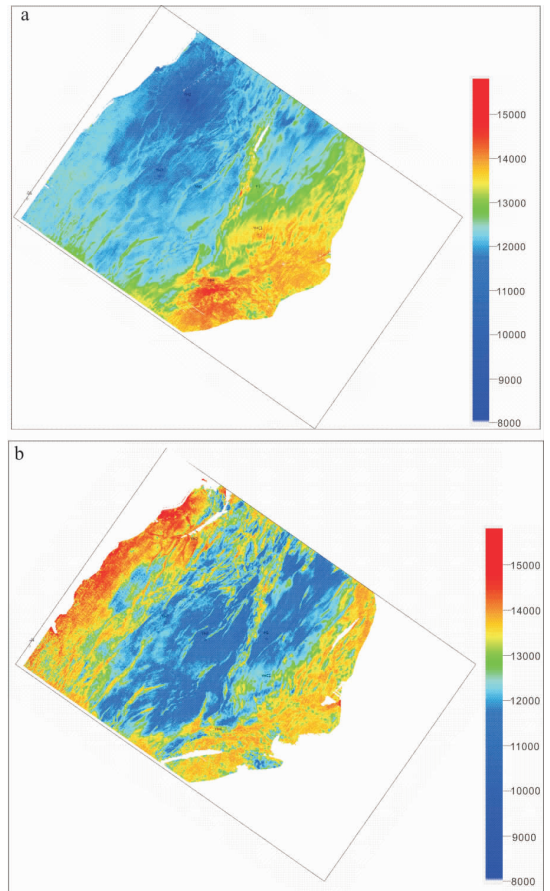
图 7 拟声波相控分频反演波阻抗结果剖面图

Fig. 7 The results of pseudo-sonic frequency-divided inversion by phase-controlled

4 应用效果

银额盆地哈日凹陷目前油气勘探发现主要以 YHC1 井巴音戈壁组二段灰质泥岩高产天然气藏为主。经上述关键技术在该区的应用,在哈日凹陷三维地震工区范围内巴音戈壁组二段共识别灰质泥岩油气藏有利目标区面积为 52 km² (图 9 中黑色点线圈定范围)。

图 9 是哈日凹陷巴音戈壁组二段灰质泥岩目标综合识别图,是利用地震属性优化结果(图 6)和相控分频波阻抗反演结果(图 8b)再利用主成分分析技术,提取各结果反映灰质泥岩“甜点”储层的优势成分得到的,充分结合了灰质泥岩储层的地震属性、波阻抗等特征,有效减少了预测结果的多解性。从图 9 平面分布来看,该区巴音戈壁组二段泥岩有利储层主要集中在凹陷中部,沿构造走向呈近东北状条带分布,最为集中“甜点”储层发育区域为沿 YHC1 井向东北方向发育,同时在 YHC1 井正西方向也发育一块比较集中连片的“甜点”储层发育区域。另外,在 YHC1 井向 H2 井方向也零星发育部



a. 常规分频反演结果; b. 相控分频反演结果

图 8 巴音戈壁组二段波阻抗反演结果平面图

Fig. 8 Floor plan of wave impedance inversion results of the K₁b₂ Formation

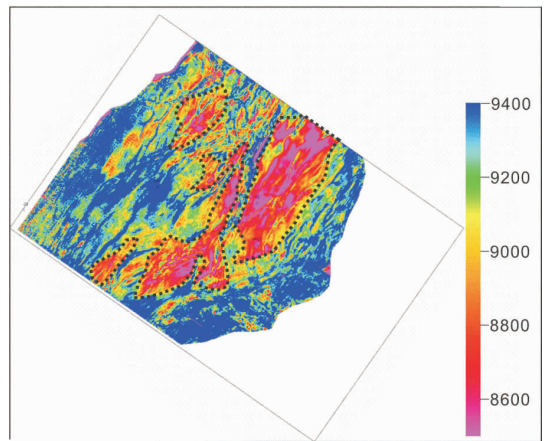


图 9 巴音戈壁组二段灰质泥岩目标综合识别图

Fig. 9 Unconventional target recognition map of gray mudstone targets in the K₁b₂ formation

分“甜点”储层。结合有机碳、成熟度、厚度、构造等综合评价,在该区部署了3口预探井位,经实钻分析,均钻遇预测的巴音戈壁组二段灰质泥岩目标,并获得大套油气显示,从而证明了该方法的有效性和实用性。

5 认识与结论

(1)低频大功率可控震源激发和低频保护且保真保幅的地震处理技术可获得高精度宽频地震资料,对于哈日凹陷这类小型复杂断陷贫瘠沉积的地震-沉积相识别具有较大优势。

(2)小型断陷复杂沉积环境下的灰质泥岩“甜点”储层识别是目前该区油气勘探的难题,笔者所述的以宽频地震数据为基础,利用井震联合地震相识别、虚切片等技术建立精细的地震-沉积相立体控制边界,再采用相控约束的多属性灰质泥岩识别、拟声波曲线重构与相控分频属性反演等技术在内的灰质泥岩天然气藏识别技术体系,虽然看似简单常用,未有大的理论技术创新,但其相辅相成、有机结合,在哈日凹陷灰质泥岩油气藏识别中发挥了巨大作用,取得了较为显著的勘探效果,具有简单、实用、经济的特点,同样值得在类似油气藏的识别中推广应用。

参考文献(References):

钟福平,钟建华,王毅,等. 银根-额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩地球化学特征与成因[J]. 矿物学报, 2014, 34(1): 107-116.

ZHANG Fuping, ZHOU Jianhua, WANG Yi, et al. Characteristics of the Early Cretaceous Mantle-Derived Volcanic Rocks in the Suhongtu Depression of Inngen-Ejina Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 34(1): 107-116.

刘春燕,林畅松,吴茂炳,等. 银根-额济纳旗中生代盆地构造演化及油气勘探前景[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1328-1335.

LIU Chunyan, LIN Changsong, WU Maobing. The Structural Evolution and Prospects for Oil and Gas Exploration in the Mesozoic Yinjin-Ejina Basin [J]. Chinese Geology, 2006, 33(6): 1328-1335.

王香增,陈治军,任来义,等. 银根-额济纳旗盆地苏红图坳陷H井钻石LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义[J].

沉积学报, 2016, 34(5): 853-867.

WANG Xiangzeng, CHEN Zhijun, REN Laiyi, et al. U - Pb Age of Zircon and Its Geological Significance in Suhongtu Depression, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5): 853-867.

余琪祥,陈君,余风华. 西北中小型盆地油气资源潜力与勘探领域分析[J]. 西北地质, 2016, 49(1): 224-233

YU Qixiang, CHEN Jun, YU Fenghua. Hydrocarbon Resource Potential within Middle-and Small-sized Basins and Their Exploration Fields in Northwest China [J]. Northwestern Geology, 2016, 49(1): 224-233.

陈启林,卫平生,杨占龙. 银根-额济纳旗盆地构造演化与油气勘探方向[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 311-315.

CHEN Qilin, WEI Pingsheng, YANG Zhanlong. The Tectonic Evolution and Oil and Gas Exploration Direction in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Petroleum Experimental Geology, 2006, 28(4): 311-315.

董洪凯,孟庆涛,刘广,等. 内蒙古北山地区标山一带早志留世花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2018, 51(01): 159-174.

DONG Hongkai, MENG Qingtao, LIU Guang, et al. Geochemical Characteristics of Early Silurian Granite from Biaoshan Area in Beishan, Inner Mongolia and Their Tectonic Implications [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(01): 159-174.

白晓寅,贺永红,任来义,等. 银根-额济纳旗盆地苏红图坳陷西区构造特征与演化[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 57-61.

BAI Xiaoyin, HE Yonghong, REN Laiyi, et al. Structural Characteristics and Evolution of the West Area of Suhongtu Depression in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2017, 36(2): 57-61.

赵春晨,刘护创,任来义,等. 银额盆地 YHC1 井白垩系气藏形成的地质环境及其远景意义[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 439-451.

ZHAO Chunchen, LIU Huchang, REN Laiyi, et al. Geological environment and prospective significance of Cretaceous gas reservoir in Well YHC1 of Yin'e Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 439-451.

刘致水,孙赞东. 新型脆性因子及其在泥页岩集层预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 117-124.

LIU Zhishui, SUN Zandong. New brittleness indexes and their application in shale/clay gas reservoir prediction [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 117-124.

- 许杰,何治亮,董宁,等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩层序及页岩气“甜点”地震预测[J]. 海洋地质前沿, 2019,35(06):31-38.
- XU Jie, HE Zhiliang, DONG Ning, et al. The Shale Sequence Of Longmaxi Formation And Seismic Prediction Of Sweet Spots Of Shale Gas In The Jiaoshiaba Area, SICHUAN BASIN[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(06):31-38.
- 张宏,刘兵,刘炎坤,等. 辽河坳陷低频可控震源地震采集技术应用[J]. 长江大学学报(自然版), 2016, 13(31): 41-45.
- ZHANF Hong, LIU Bing, LIU Yankun, et al. The application of seismic acquisition technology based on low-frequency vibrator in liaohe depression[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(31):41-45.
- 倪宇东,王井富,马涛,等. 可控震源地震采集技术的进展[J]. 石油地球物理勘探, 2011,46(3):349-356.
- NI Yudong, WANG Jingfu, MA Tao, et al. Development of vibroseis seismic acquisition technology[J]. OGP, 2011, 46(3):349-356.
- 魏国伟,张慕刚,魏铁,等. 可控震源滑动扫描采集方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008,43(增刊2):67-69.
- WEI Guowei, ZHANG Mugang, WEI Tie, et al. Vibroseis sliding scan acquisition method and application [J]. OGP, 2008,43(Suppl.):67-69.
- 张军华,张在金,张彬彬,等. 地震低频信号对关键处理环节的影响分析[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 54-62.
- ZHANG Junhua, ZHANG Zaijin, ZHANG Binbin, et al. Low frequency signal influences on key seismic data processing procedures[J]. OGP, 2016,51(1):54-62.
- 刘震,张万选. 陆相断陷盆地地震相解释专家系统[J]. 石油地球物理勘探, 1992,27(2):261-269.
- LIU Zhen, ZHANG Wanxuan. Expert system for seismic facies interpretation in continental fault basin[J]. OGP, 1992,27(2):261-269.
- 常迈,韩军,刘震,等. 准噶尔盆地阜东斜坡带石树沟群地震相分析及沉积体系预测[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006,21(6):20-23.
- CHANG Mai, HAN Jun, LIU Zhen, et al. Analysis of seismic facies and prediction of sedimentary system of Shishugou Group on the East Fukang Slope of Zhungeer Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006,21(6):20-23.
- 印兴耀,孔国英,张广智. 基于核主成分分析的地震属性优化方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2): 179-183.
- YIN Xingyao, KONG Guoying, ZHANG Guangzhi. Seismic attributes optimization based on kernel principal component analysis(KPCA)and application[J]. OGP, 2008,43(2):179-183.
- 印兴耀,周静毅. 地震属性优化方法综述[J]. 石油地球物理勘探, 2005,40(4):482-489.
- YIN Xingyao, ZHOU Jingyi. Overview of Seismic Attribute Optimization Methods[J]. OGP, 2005,40(4):482-489.
- 倪凤田. 基于地震属性分析的储层预测方法研究[D]. 东营:中国石油大学, 2008.
- NI Fengtian. Research on reservoir prediction method based on seismic attribute analysis[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.
- 贺懿,刘怀山,毛传龙,等. 多曲线声波重构技术在储层预测中的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(5): 549-556
- HE Yi, LIU Huaishan, MAO Chuanlong, et al. Study on application of multi-curve sonic reconstructive technique in prediction of reservoir [J]. OGP, 2008, 43(5): 549-556.
- 于建国,韩文功,刘立辉. 分频反演方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006,41(2):193-197.
- YU Jianguo, HAN Wengong, LIU Lihui. Application of frequency-divided inversion [J]. OGP, 2006, 41(2): 193-197.
- 白晓寅,黄玉,陈永波,等. 低幅度构造—岩性油气藏识别技术[J]. 石油地球物理勘探, 2012,47(2):291-297.
- BAI Xiaoyin, HUANG Yu, CHEN Yongbo, et al. Recognition of low relief structure-lithologic servoir[J]. OGP, 2012,47(2):291-297.