

## 油气双相介质理论在辽西凹陷南部岩性圈闭中的应用

陈希光<sup>1</sup>, 陈 昌<sup>2</sup>, 王 波<sup>1</sup>, 马玉亮<sup>2</sup>, 安新蕾<sup>3</sup>, 宋 兵<sup>1</sup>, 杨 钊<sup>1</sup>

1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023;

2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124000;

3. 中国石油辽河油田公司冷家开发公司, 辽宁 盘锦 124010

**摘 要:** 辽河西部凹陷是辽河拗陷主要的生油凹陷。随着勘探程度的提高, 勘探难度不断增大, 近年来对辽西凹陷鸳鸯沟和清水洼陷坡折带以下的岩性油气藏勘探需求日益旺盛。通过双相介质油气勘探方法, 利用小波变化时频分析特性, 提取地震波能量和频率成分, 对工作区内探井频谱特征进行了样本学习, 总结出了区内高产井和无油井的频谱特征, 预测出勘探风险区域的油气富集程度, 再结合地球物理反演技术, 明确了下一步岩性圈闭的勘探潜力区域, 以降低勘探风险。

**关键词:** 双相介质; 烃类检测; 沙二段; 岩性油气藏; 辽西凹陷

## APPLICATION OF HYDROCARBON DETECTION METHOD BASED ON TWO-PHASE MEDIA THEORY IN THE LITHOLOGIC TRAPS IN SOUTHERN LIAOXI SAG

CHEN Xi-guang<sup>1</sup>, CHEN Chang<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, MA Yu-liang<sup>2</sup>, AN Xin-lei<sup>3</sup>, SONG Bing<sup>1</sup>, YANG Zhao<sup>1</sup>

1. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, CNPC, Hangzhou 310023, China;

2. Exploration and Development Institute of Liaohe Oilfield Branch, CNPC, Panjin 124000, Liaoning Province, China;

3. Lengjia Development Company of Liaohe Oilfield Branch, CNPC, Panjin 124010, Liaoning Province, China

**Abstract:** The Liaoxi sag is the main oil source area in Liaohe Depression. With the improvement of prospecting level, the exploration becomes more difficult. Accordingly, there is an increasing exploration demand for lithologic reservoirs under the slope-break belt of Yuanyanggou and Qingshui sub-sags in Liaoxi sag recently. The oil-gas exploration method based on two-phase media theory is adopted to extract the energy and frequency components of seismic waves by the characteristics of analysis on time frequency of wavelet transformation. With the sample learning of spectrum characteristics of exploratory wells, the paper summarizes the spectrum features of high-yield and oil-free wells, predicts the oil-gas enrichment degree in exploration risk areas, combined with geophysical inversion technique, and then defines the potential areas for further exploration of lithologic traps to reduce risk.

**Key words:** two-phase media; hydrocarbon detection; the 2nd Member of Shahejie Formation ( $E_{s2}$ ); lithologic reservoirs; Liaoxi sag

收稿日期:2018-03-30;修回日期:2018-06-11. 编辑:李兰英.

基金项目:十三五国家重大科技专项“大型岩性油气藏形成主控因素与有利区带评价”(编号 2017ZX-05001-002);国家科技重大专项“前陆冲断带及复杂构造区地质演化过程、深层结构与储层特征”(2016ZX05003-001);中国石油科技重大专项“塔里木油田勘探开发关键技术研究”(编号 2010E-2100).

作者简介:陈希光(1988—),男,硕士,工程师,主要从事地震资料解释与储层预测研究工作,通信地址 浙江省杭州市西溪路 920 号,E-mail//chenxg\_hz@petrochina.com.cn

## 0 引言

辽河西部凹陷是辽河拗陷的主要生油凹陷,过去几十年勘探重点目标主要集中在辽河拗陷坡折带以上的构造油气藏,目前勘探程度已经很高,大部分地区已投入开发<sup>[1]</sup>。西部凹陷西斜坡下台阶即坡洼过渡带由于受目的层埋藏较深、地震资料品质差等因素的影响,勘探程度相对较低。随着勘探程度的不断提高,构造油气藏勘探难度越来越大。近年来,对坡折带以下的岩性油气藏的勘探需求日益旺盛<sup>[2]</sup>。坡折带以下的岩性油气藏在多年的勘探中,取得了一定的勘探效果,比如鸳鸯沟洼陷的 A1 井、清水洼陷的 B2 井,都是典型的岩性油气藏,试油效果好,累积产量高,展示了西部凹陷南部地区岩性油气藏较大的勘探潜力。但是陆相盆地岩性圈闭一般发育在陡坡带、缓坡的坡洼过渡带或者盆地湖盆中间位置<sup>[3]</sup>。这些位置一般钻井资料少,地质认识不够清楚,并非构造有利区域,所以对含油气性评价难度比较大,证据比较匮乏。

而利用地震资料直接进行油气预测在油气勘探中已经被人们越来越重视。以往直接利用 AVO、小波分析、多波多分量流体检测等技术方法直接进行油气预测已经被人们熟知<sup>[4]</sup>,但是这些方法都存在着一定的技术缺陷,比如叠前 AVO 分析,叠前数据的分析和计算不仅工作量大,而且叠前数据还存在着大偏移距拉伸畸变和反射能量弱等问题。以往很多碳氢化合物检测的技术理论是单相介质,但是当地下储层孔隙度比较大或者岩石孔隙中流体密度比较大时,单相介质油气检测会出现明显的偏差。本文主要采用叠后数据进行油气预测,根据 Boit 双相介质理论,对辽河西部凹陷南部鸳鸯沟洼陷和清水洼陷坡折带以下沙二段地层进行油气预测,指出有利岩性勘探区域,用纯地球物理手段预测和地质规律相互验证结合以降低勘探风险,明确下一步勘探潜力区域。

本次研究的范围是辽河西部凹陷南部的鸳鸯沟洼陷和清水洼陷(图 1),目的层位是沙二段。该区域发育着多套低位域砂体,在清水-鸳鸯沟洼陷周缘尖灭<sup>[5]</sup>。清水洼陷沙二沉积时期,受边界大洼断层的控制,来自东侧中央凸起的物源入湖形成水下扇三角洲,并向西侧尖灭。断裂坡折带控制着低位域砂体的发育,其沉积主要是扇三角洲前缘水下分流河道、河口坝和浊积砂体。晚东营期由于右旋走滑形成的近东西向断层对

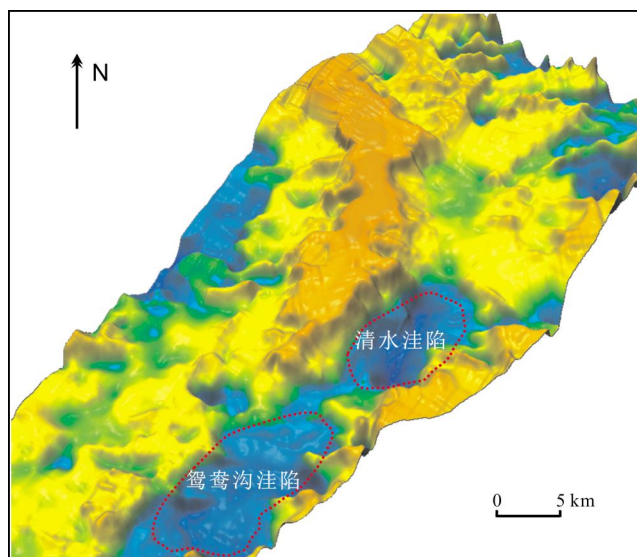


图 1 沙二段沉积时期古地貌图

Fig. 1 Paleogeomorphic map of the Es<sub>2</sub> in sedimentary period

扇体起到切割作用,目前该区已发现的油气藏都是典型的岩性油气藏,说明该区具备有岩性油气藏的地质条件,是目前挖潜增储的现实领域。

## 1 方法原理

自从 1956 年 Biot 建立双相介质理论中的波动方程后,主要应用在岩土工程方面,直到 1994 年才开始应用于地震勘探。单相介质是把地下介质简化,把地下储层看作为纯固体介质<sup>[6]</sup>,这样的观点在岩石孔隙度很小或者当孔隙中流体的密度很小的时候是成立的,但是当岩石中孔隙度比较大或者孔隙中流体弹性模量和其密度均较大时,单相介质理论就会出现明显的偏差,很多时候甚至会出现不正确的结论。随着双相介质理论不断发展,利用双相介质进行油气勘探逐渐得到推广。张会星等利用双相介质理论进行了正演数值模拟试验,得出结论:当地下储层中充满油或气时,地震波穿过地下储层,能量会再一次分配(图 2),地震波能量会向着低频方向运动,地球物理响应特征为低频共振<sup>[7-9]</sup>。低频共振现象所指的是:地下储层含有油气后,引起低频带能量瞬时加强,而高频衰减早已经被我们熟知,高频衰减所指的是:与致密储层相对比,当地质体中含有油气后,会引起地震高频带能量的衰减和地震波的散射,很多实际资料已经验证了这一特征<sup>[10]</sup>。

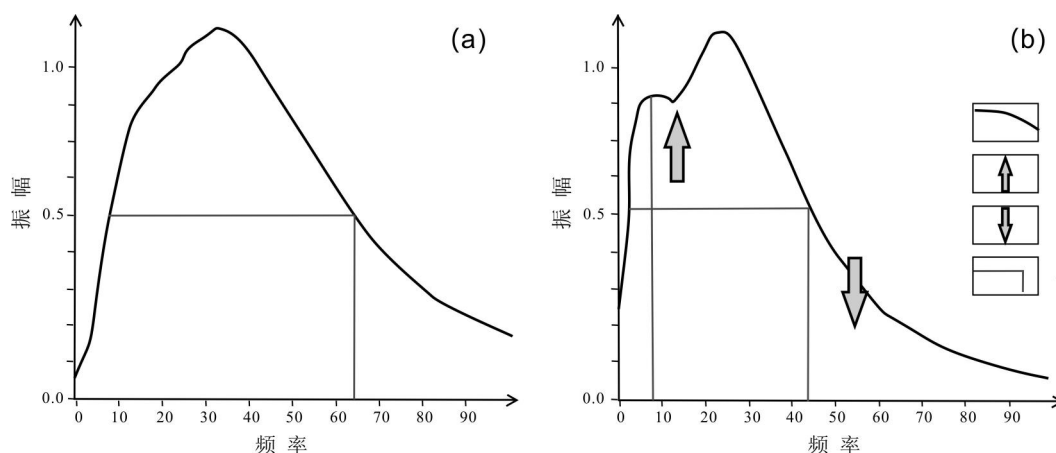


图 2 含油气频谱特征图

Fig. 2 Features of oil and gas spectrum

a—无油气区(non-oil-gas area); b—含油气区(oil-gas bearing area); 1—频谱线(spectrum line); 2—低频共振(low-frequency resonance); 3—高频衰减(high-frequency attenuation); 4—频带宽度(frequency bandwidth)

具有孔隙的固体骨架(即固相)和孔隙中所充填的流体(即流相)所组成的介质被称为双相介质,地下岩石的骨架可以看作是固相,流相则是充填于骨架或者裂缝和空隙中的液体和气体,地震波在单相介质中传播与在双相介质中传播时的规律有所不同.由于固相介质和流相介质两者之间的相互作用,地震波在地下介质中的传播规律变得更加复杂.地震波在地下介质中传播时其动力学特点与地下介质的特征有关,地震波的弹性能量在传播过程中会转化为热能或其他能量而耗散<sup>[11]</sup>,同时地震波的振幅也会得到衰减.地下不同的岩性会对地震波造成不同的吸收程度,同时也会引起地震子波形态的不断变化,地层的吸收越强会造成子波形态变化越大,地震波的高频成分衰减得越快<sup>[12]</sup>.因此在地震反射记录中,除了透射损失和球面扩散外,还存在着地下介质对地震波的吸收和衰减现象,吸收和衰减都是随着频率的变化而变化.油气双相介质检测的基本原理为:当石油或者天然气存在于地下储层中时,在地震引起激发后,会造成地下石油天然气颗粒之间的相对运动,地下储层中的石油或者天然气与地震波的低频端得到共振,使得低频能量得到加强.地震波在地下介质传播的过程中,本身就会发生一定的衰减现象,然而如果储层中含有石油或者天然气时,这些油气对高频成分的吸收会显得非常显著,这也就是高频衰减现象.

Biot<sup>[13-14]</sup>理论认为,当地震波穿过地下介质时,固

相和流相之间发生相互作用并产生相对的位移,并且产生第二纵波.第二纵波的速度很低并且极性与第一纵波极性相反,第二纵波和第一纵波相互叠加后,原有的动力学特征被改变,不同流体介质改变的程度有所不同<sup>[15]</sup>.实际上的地下储层不仅仅是双相介质,而且还是各向异性的.根据达西定律和广义虎克定律,假如多孔介质的孔隙单元之间是相互连通的<sup>[16]</sup>,那么地震波在含有流体的介质中传播时满足以下方程式:

$$\mathbf{N} \nabla^2 \mathbf{u} + \text{grad}[(A+N)\theta + Q\varepsilon] = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}\mathbf{u} + \rho_{12}\mathbf{U}) + b \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\mathbf{u} - \mathbf{U})$$

$$\text{grad}[Q\theta + R\varepsilon] = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}\mathbf{u} + \rho_{12}\mathbf{U}) - b \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\mathbf{u} - \mathbf{U}) \quad (1)$$

以上是双相介质弹性波动方程,式中: $b$ 为耗散系数,与地下流体介质的孔隙度、渗透率和流体的黏滞系数等参数有关,当不考虑固体介质和流体介质之间的相对运动而产生的位移时, $b$ 为0<sup>[17]</sup>;  $A$ 和  $N$ 相当于单相介质各向同性弹性体中的拉梅系数; $\rho_{11}$ 为单位体积的固体相对于流体运动期间的固体部分的总质量; $\rho_{12}$ 为单位体积的流体相对于固体运动期间的流体部分的总质量; $\rho_{22}$ 为单位体积中固体和流体之间的质量耦合系数; $Q$ 为固体体积与流体体积之间变化的弹性常数; $\theta$ 为固体的体应变; $\varepsilon$ 为流体的体应变; $u$ 为介质液体位移; $U$ 为介质固体; $\nabla$ 为拉普拉斯算子; $\text{grad}$ 为梯度算子.

$$A = \frac{\eta \phi^2}{k} \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) \quad (2)$$



式中  $\eta$  为流体黏滞系数;  $\phi$  为孔隙度;  $k$  为渗透系数. 地震波的振幅衰减与衰减系数  $\frac{\eta\phi^2}{k}$  及流体介质与固体介质之间的相对运动速度  $\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t}$  成正比<sup>[18]</sup>. 当介质内流体与固体的相对运动速度小时, 地震波衰减减小, 而振幅大, 这也就是“共振”. 随着地震波频率的增加, 在某一频率上, 地震波衰减最大, 而振幅最小, 也就是高频衰减现象.

2 实际应用效果

辽河西部凹陷具备典型的断陷湖盆的特征, 平面上呈出一个“箕状”特征, 整个古近系是一个“东断西超”的特点, 断层的一侧为盆地的陡坡带, 超覆的一侧为盆地缓坡带<sup>[19]</sup>. 通过地质分析认为该地区沙二段处在深湖—半深湖沉积环境, 发育了多套低位域砂体, 在清水—鸳鸯沟洼陷周缘尖灭, 多套储盖组合相互叠置发育扇三角洲沉积, 储层薄、细、砂泥互层特征明显. 单砂体厚度主要集中在 2~4 m, 基本在 8 m 以下. 由于岩性复杂, 常规阻抗难以完全区分各类岩性. 该区岩性包括细砂岩类、粉砂岩类、泥质岩类, 也包括含灰粉砂岩、含灰泥岩、油页岩等多种岩性. 从各类岩性阻抗直方图来看, 砂岩类与泥质岩类阻抗可以区分, 但是细砂岩类与含灰岩类比较难以区分.

用常规的地球物理手段很难准确预测单砂体, 无法满足岩性勘探的要求, 勘探陷入很大的被动性和局

限性. 抛弃传统的技术方法, 突破受制于地震识别单砂体的最低要求, 利用地震资料直接进行油气预测在油气勘探中已经被人们越来越重视.

2.1 资料概况

研究区地震资料主频 15 Hz 左右, 频带宽度 5~60 Hz (图 3), 没有截频现象, 主频比较低, 根据理论最大分辨砂体厚度, 该主频只能分辨 60 m 的砂体. 区内目的层埋深 3300~4200 m, 图 3 地震剖面纵坐标显示的是时间深度, 目的层如图中方框范围内, 地震波旅行时范围约为 2400~2700 ms. 地震资料可以比较好地满足油气检测的要求, 地震资料的好坏将直接影响到油气检测的效果. 沙二段顶部广泛发育着一套厚层泥岩, 是对比的标准之一, 在地震上表现为一套强反射特征, 可持续追踪解释.

2.2 子波分解地震资料处理

由于沙二段顶部广泛发育着一套厚层泥岩, 局部地区可达到 300~400 m, 在地震上形成一套强反射同相轴. 强反射对泥岩下面的地震信息具备一定的“屏蔽”作用, 常规的地震属性很难表征出实际的地质情况. 地震时窗开到强反射轴以下, 很容易错过沙二顶面一套好的储盖组合, 所以首先得消除这种强反射对油气预测的影响.

以往只能从宏观上认识的地震剖面或者数据体通过子波分解技术可分解为不同形状不同频率的地震子波, 而被分解出来的不同形状的子波都可以控制, 然后

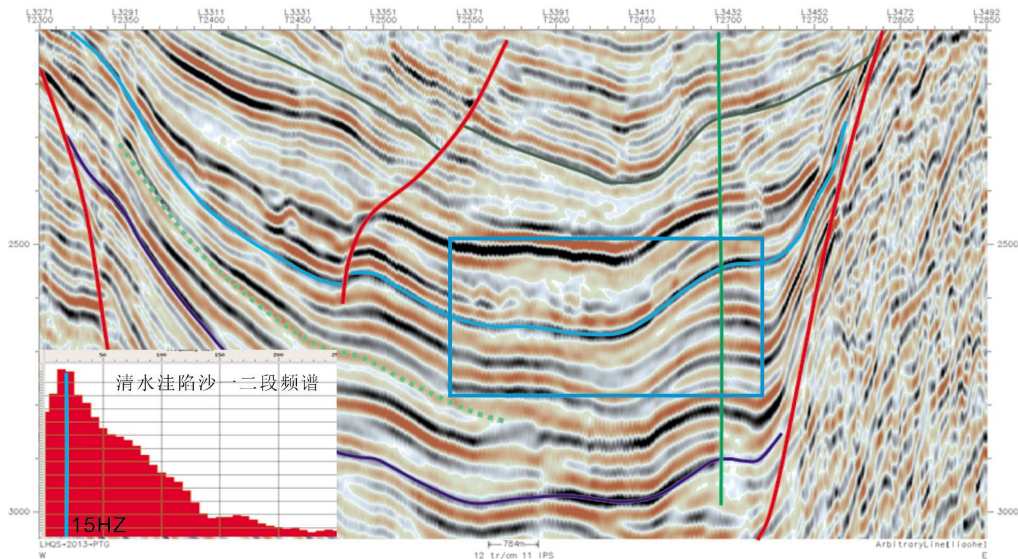


图 3 研究区地震资料频谱图  
Fig. 3 Spectrogram of seismic data in the study area

从一系列不同子波中筛选并合并成一个新的子波从而表达油气特征(图4)。结合辽河西部凹陷的地质背景和钻井油层资料,子波分解技术可以分成以下几个步骤:1)对原始地震数据体进行多子波地震道分解;2)筛选出地震子波并合成有利于油层解释的新的地震道集;3)计算地震波频率衰减系数道集;4)根据钻井获得的地质信息,筛选并且提取出对油层解释更有效的地震分量。

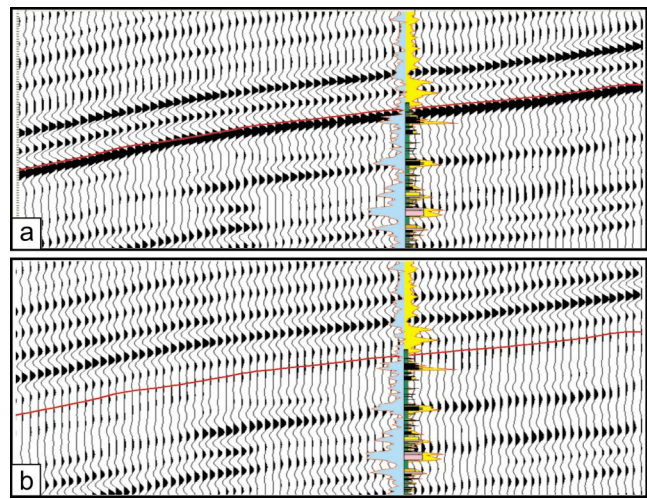


图 4 子波分解处理对比图

Fig. 4 Comparison of the seismic profiles before and after wavelet decomposition

a—子波分解处理前地震剖面(before wavelet decomposition); b—子波分解处理后地震剖面(after wavelet decomposition)

2.3 油气预测可靠性分析

在子波分解合成新的地震数据体的基础上,使用

传统傅里叶变化进行时频分析,提取地震波能量和频率成分,得到每个采样点的频谱,然后进行含油气性分析对比。

首先拿两口井频谱作对比分析,研究区范围内选了 B160 井和 B204 井,都处于扇三角洲前缘沉积相带,砂体比较发育。B160 井沙二段地层厚度为 124 m,沙二段、沙三上段试油试气结论都为干层;而 B204 井沙二段地层厚度为 155 m,试油试气结论为高产油层,油层厚度 25.8 m,日产油 82.5 t,沙三上段为干层。在精细标定并加密解释的基础上,沿 B160 和 B204 井旁地震道沙二段顶底不同时窗段进行频谱分析,时窗大小分别为: -5~0 (沙二段顶上漂 5 ms 到沙二底), -5~20 (沙二顶上漂 5 ms 到沙二底下漂 20 ms), 依此类推 -5~30、-5~40。B160 井由于没有流体介质的影响,沿着沙二向下不同时窗进行频谱分析,频谱特征几乎没有变化,主频为 16 Hz,频带宽度 5~45 Hz。但是对于高产井 B204,沙二段获得高产工业油流,由于受到流相介质影响,当地震波穿过地下的储层时,固相介质和流相介质之间发生相对位移并且发生相互作用,原有的动力学特征被改变。B204 井在沙二段频谱特征主要为单峰特征,频带宽度明显变窄,只有 5~25 Hz,主频向着低频端方向移动,大约只有 7 Hz,频谱特征主要体现的是高频的衰减和低频的共振,当时窗逐渐移动到沙三段时,沙三段干层那部分的频谱特征逐渐出现,所以双峰特征现象越来越明显(图 5)。两口井对比分析,油井的主频比干井主频低,并且频带宽度比干井的窄,满足油气双相介质特征。通过有气区和无气区频

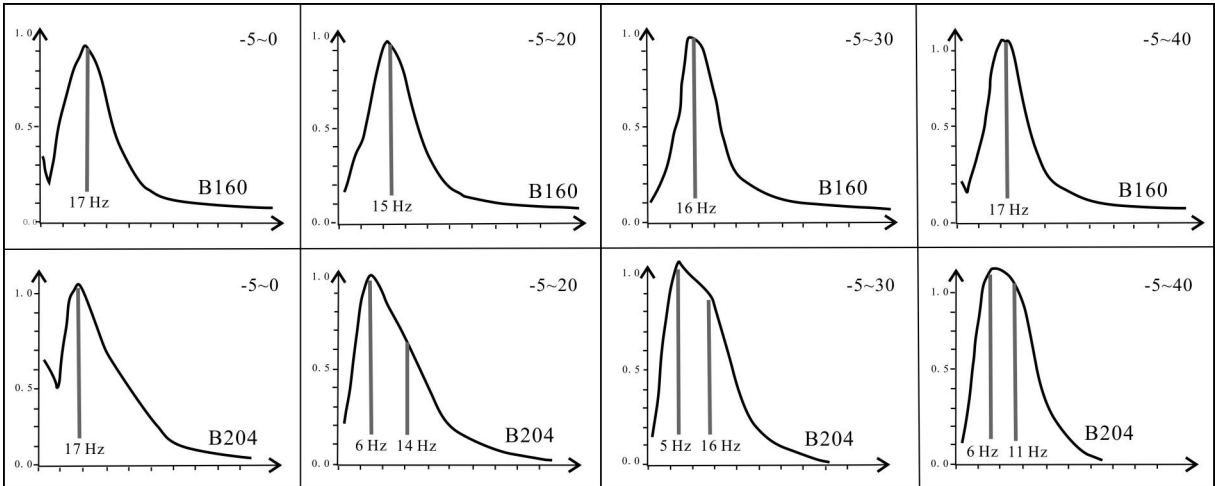


图 5 频谱分析对比图

Fig. 5 Spectral analysis comparison between B160 and B204 wells



谱分析得知,有气区频谱的瞬时带宽会变小。

同时对 B160 和 B204 井旁地震道进行时频分析, B204 井在目的层内时频谱出现低频能量增加趋势,而 B160 井没有这种现象发生。

为了寻求更精准的频谱响应参数,本研究挑选了部分高产井、低产井和无油井作为学习样本。挑选井的依据是:1)在目的层上不过大的断层,因为大的断层的存在也会引起地震波能量的散射衰减<sup>[20]</sup>;2)选择地震资料连续性较好的区域,以免由于标定解释存在的误差导致预测的不准确性;3)挑选油气层较好,储层时间厚度较大的。利用对比的结果找出油气敏感的地震频谱段。

油井频谱特征分析:频谱满足高频衰减、低频增加的响应特征,并且频谱呈现双峰的形态,带宽窄,第一个波峰在 8 Hz 左右(图 6)。无油井频谱分析:干井和水井频谱表现为单峰,主频约为 15 Hz(图 7),带宽较宽,干层没有低频增加和高频衰减特征,水层低频增加、高频衰减现象不如油层明显。通过反复的试验对比和多井综合分析,总体吻合率超过 70%。通过以上试验研究可以得出结论:双相介质油气检测在辽河西部凹陷是适用的,为以后井位论证分析提供了有力的

证据,如果设计井位井旁地震道频谱分析属于频带宽、单峰特征,无高频衰减和低频共振现象,那么该目标井位要引起重视,需要更多的论证分析。

## 2.4 预测有利区域

首先应用叠后地震属性(振幅、频率等)定性预测沉积相带大体形态。从各类岩性纵波波阻抗直方图分析来看,砂岩类与泥质岩类阻抗是可以区分的,砂岩的纵波波阻抗值大于泥岩纵波波阻抗,重叠区域不多。通过纵波波阻抗反演技术精细雕刻多期砂体的展布形态和沉积边界(图 8),从纵波波阻抗反演图中可以发现多期砂体由盆地中央向坡折带方向超覆,多套储盖组合相互叠置发育,符合地质规律,地层向西斜坡逐渐超覆,发育坡折控制的低位域砂体、陡坡扇砂体、前缘砂坝砂体。但是由于成藏的复杂性,不能明确砂体的含油气性。通过进一步计算对比分析地震时窗内高低频段内频谱的变化情况,寻找出满足低频共振、高频衰减特征的分布区域,最终确定了西部凹陷沙二段鸳鸯沟洼陷油气检测结果平面图,利用部分没有参与频谱分析的井验证油气预测的结果,其可靠性也比较高,印证了此套油气预测方法的可行性。

在纵波波阻抗反演技术基础上,明确砂体的展布

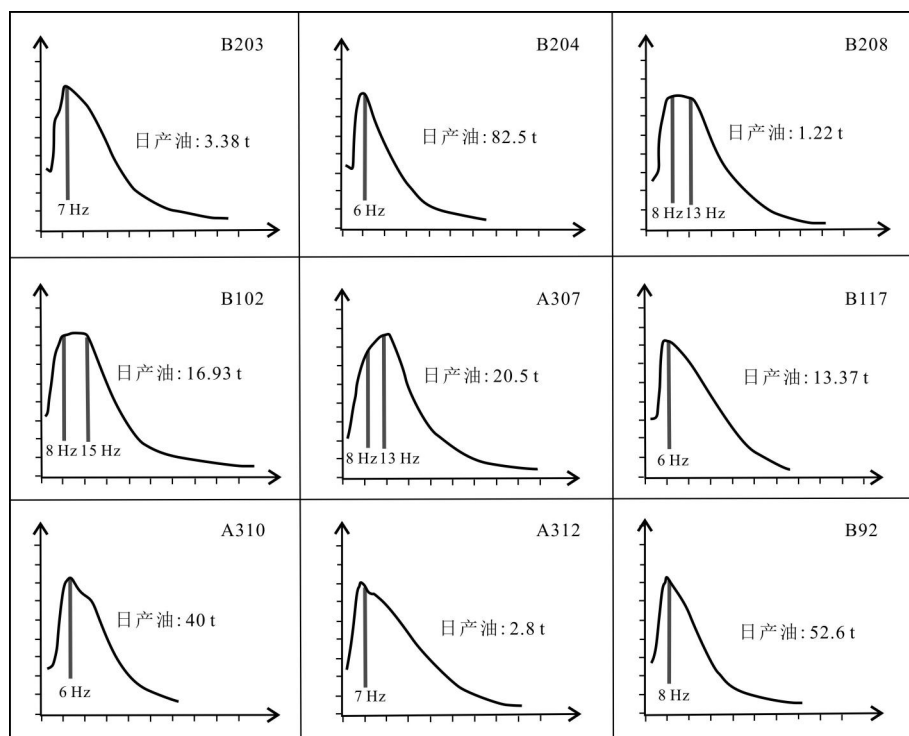


图 6 油井频谱分析图

Fig. 6 Spectral analysis of oil wells

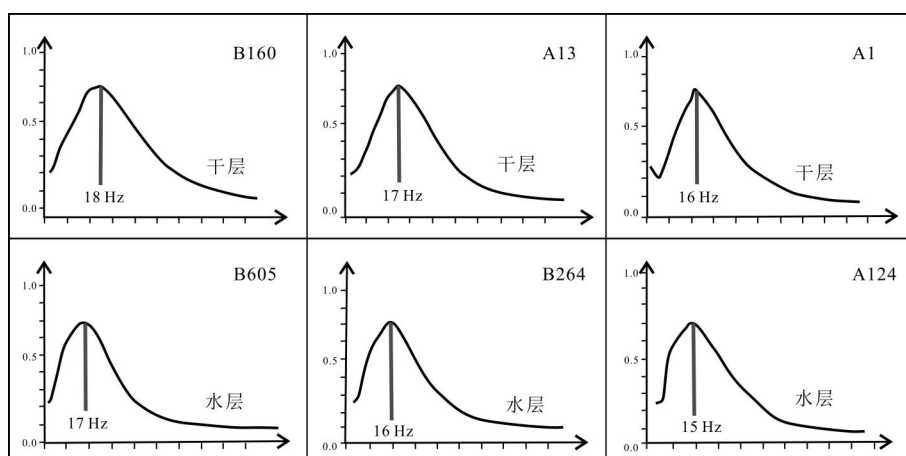


图 7 无油井频谱分析图

Fig. 7 Spectral analysis of oil-free wells

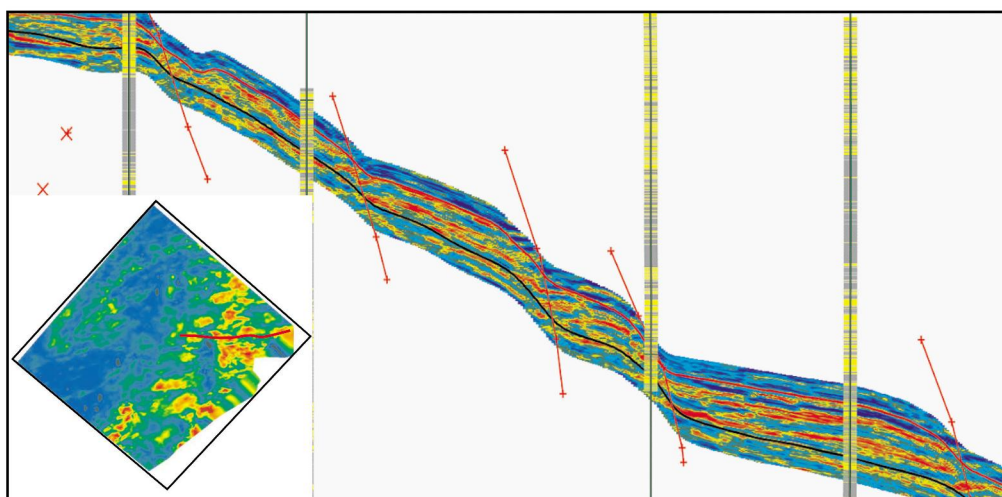


图 8 纵波波阻抗反演剖面

Fig. 8 P-wave impedance inversion profile

形态, 结合油气双相介质检测技术检测砂体发育范围内的含油气性, 圈出 6 个油气藏有利勘区, 增加有利岩性勘探面积 75 km<sup>2</sup>, 其中清水洼陷 4 个, 共 49 km<sup>2</sup>, 鸳鸯沟洼陷 2 个, 共 26 km<sup>2</sup> (图 9)。此套技术形成一个逐级深入、层层推进的过程, 为岩性油气藏勘探提供了依据, 可为下一步勘探指明具体的目标, 提高勘探成功率。

### 3 结论

通过以上分析可以得出以下认识:

1) 地震资料的品质和解释精细程度直接影响到油气检测的效果。地震资料品质太差 (比如低频成分保护程度不够), 会影响到地震记录“低频共振”的特征响

应, 因此在地震资料处理时应保护好低频成分。另外, 应增加地震资料的解释精细度, 尽量减小解释层位存在的误差, 从而提高目的层段油气检测的可靠性。

2) 通过有井区样本频谱分析, 总结出该区域油井的频谱范围和特征, 预测出清水凹陷和鸳鸯沟凹陷坡折带以下无井区的油气分布范围, 具备一定的可行性。通过油气检测结果与研究区井的试油试气结论进行对比, 符合率较高, 取得了比较好的效果, 为下一步岩性油气藏的勘探提供了重要依据。

3) 在纵波波阻抗反演技术基础上, 明确纵向多套储盖组合相互叠置关系和砂体的平面分布, 结合油气双相介质检测技术, 指出了岩性油气藏勘探的有利区, 为辽河西部凹陷南部岩性油气藏勘探奠定了有利的基础。

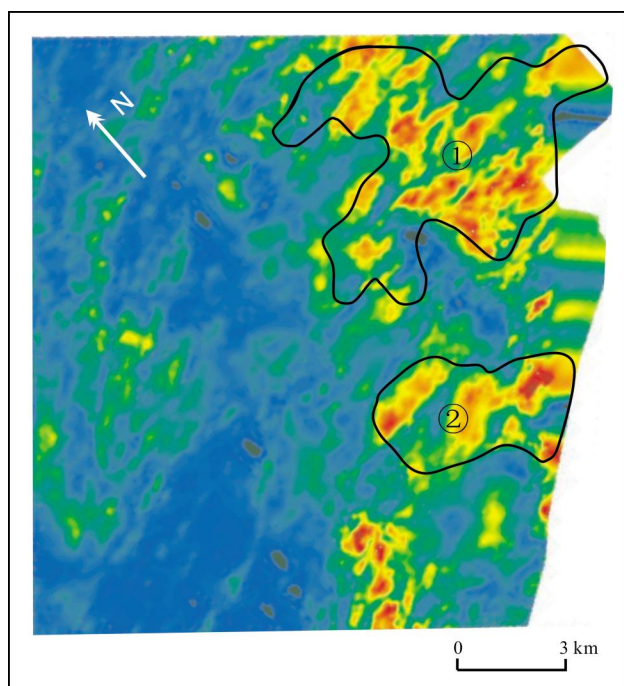


图 9 有利勘探区域预测图

Fig. 9 Prediction of favorable exploration areas

①②—有利勘探区域(favorable exploration area)

#### 参考文献:

- [1] 李晓光, 张金川, 陈振岩, 等. 辽河拗陷西部凹陷油气成藏体系及天然气分布[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 39-43.
- [2] 杜金虎, 邹伟宏, 易士威, 等. 华北油田隐蔽油藏的勘探[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(3): 7-15.
- [3] 李宏伟, 朱怡翔, 李胜利, 等. 辽河西部凹陷北部地区隐蔽油气藏预测与成藏机制分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 44-46.
- [4] 刘企英. 利用地震信息进行油气预测[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 4-8.
- [5] 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.
- [6] 张会星, 何兵寿, 梁秀文. 双相介质中地震波动方程正演模拟[C]. CPS/SEG 2004 国际地球物理会议, 2004: 174-176.
- [7] 张会星, 何兵寿, 姜效典, 等. 利用地震波在双相介质中的衰减特性检测油气[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 343-349.
- [8] 张会星, 何兵寿, 宁书年. 双相介质中纵波方程的高阶有限差分法[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 307-309.
- [9] 张艳芳, 王权锋. 基于双相介质的地震油气检测技术[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 803-807.
- [10] 何又雄, 钟庆良. 地震波衰减属性在油气预测中的应用[J]. 江汉石油科技, 2007, 17(3): 9-11.
- [11] 朱红涛. 频带吸收系数技术在莺歌海盆地乐东地区储层横向预测中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2002, 25(4): 62-67.
- [12] 边树涛, 董艳蕾, 郑浚茂. 地震波频谱衰减检测天然气技术应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 296-300.
- [13] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturateporous solid, I: Low-frequency range [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- [14] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturateporous solid. II: Higher frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.
- [15] 商伟, 李迪. 基于双向介质的地震油气检测方法[J]. 油气地球物理, 2015, 13(2): 27-31.
- [16] 朱建伟, 李云辉. 含油水各向异性孔隙介质中地震波传播方程[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 193-196.
- [17] 关晓魏. 基于双向介质的 ABV 油气检测技术及应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 435-438.
- [18] 撒利明, 梁秀文, 刘全新. 一种基于多相介质理论的油气检测方法[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6): 32-35.
- [19] 姚继峰, 廖兴明, 于天欣. 辽河盆地构造分析[J]. 断块油气田, 1995, 2(5): 21-26.
- [20] 张景业, 贺振华, 黄德济. 地震波频率衰减梯度在油气预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(3): 207-212.