

河流相砂体追踪与预测技术

——以港东开发区为例

牟智全^{1,2}, 周立宏², 蒲秀刚², 常红², 赵仕民², 刘义², 孙伟红²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国石油大港油田公司, 天津 大港 300280)

摘要:港东开发区明化镇组和馆陶组属于河流相沉积,应用高分辨率层序地层对比技术在明化镇组和馆陶组砂体细分小层的基础上,以三维地震资料为基础,通过精细层位标定确定储层砂体的地震响应特征,遵循层序对比的原则加密解释到小层,利用先进的分频处理解释技术和三维可视化技术,追踪河道砂体的分布范围。运用以点带面和以面促点的研究方法,对研究成果与实际钻井开展匹配分析。通过实际应用,取得了明显地质效果,为河道追踪预测技术提供了新的研究方法和手段。

关键词:河流相;层位标定;分频;河道预测追踪;港东开发区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2009)02-0263-06

0 引言

港东开发区位于港东主断层下降盘的逆牵引背斜构造带,研究区内目前钻遇的地层自下而上分别为沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组、第四系。馆陶组、明化镇组地层属于河流相沉积,呈不等厚砂泥岩交互层,平面岩性变化较大。港东开发区主要目的层馆陶组为一套辫状河沉积,在馆陶组形成“砂包泥”沉积特点,分为4个油层组16个小层,明化镇组下段为一套曲流河沉积,明化镇组形成“泥包砂”沉积特点,分为4个油层组31个小层。研究区内港东断层、马棚口断层沟通深层歧口凹陷油源,其派生断层发育,可作为良好供油断层。明化镇组、馆陶组油组埋藏浅,砂体发育,构造和断层、砂体匹配关系适当时就可形成浅层次生岩性油气藏^[1-3]。

此次研究的主要目的层是馆陶组、明化镇组河道沉积砂体。在岩性油气藏成藏理论指导下,以地质研究为前提,从出油井点(或有利出油层位)出发,充分应用三维地震信息,以井震结合的相控等时对比为基础,运用精细构造解释、地震属性分析、分频解释、三维显示等特色技术,进行多信息综合研究,准确认识构造和储层分布是该区寻找滚动增储目标

的关键。

1 地质特征

1.1 储层特征

该区储层属河流相沉积,剖面上呈单一的砂岩、泥岩不等厚互层分布,油层主要集中在上第三系明化镇组下段和馆陶组顶部,共划分8个油组、47个小层,含油井段长达1 000 m,油层变化较大,单井平均有效厚度为15 m,最厚可达69.9 m。主力油层分布在明Ⅲ、明Ⅳ油组,地质储量占开发区总储量的70.9%左右。油层平面分布不均,断块间含油差异大,总体特征是构造高部位断块含油好,边部断块变差。主力油层以泥质胶结的细砂岩为主要储层,平均泥质含量为8.4%,碳酸盐含量为2.9%,以孔隙式和接触式胶结类型为主。平均孔隙度为32%,渗透率变化大,平均空气渗透率为 $1\ 051.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属高孔高渗胶结疏松的砂岩储层。

1.2 油气分布特征

港东开发区油藏属复杂断块型次生岩性油气藏,油层的空间分布受构造、岩性双重因素的影响,显示出较强的非均一性,油层的纵向、平面分布具有以下特点:

1.2.1 纵向分布特点

纵向上明化镇组下段、馆陶组 47 个小层均有油层,含油层位多,但含油状况不一,非均一性强。油层分布上下贫中间富;油层主要集中在中部的明Ⅲ、明Ⅳ油组,其次是明Ⅱ、馆Ⅰ油组,两端的油层分布变差,明Ⅲ、明Ⅳ为本区的主力油组。本区主要含油目的层均属河流相沉积,其不同级次正旋回的沉积特点,决定着主力小层主要分布在各油组的中下部,小层内部主力含油单砂体的分布也有类似特点。

1.2.2 平面分布特点

平面上分布呈现明显的河流相岩性油气藏特点。构造位置不同,各开发区块间含油差异性较大,整个开发区不同层位、不同开发单元油层的连通性差异较大。馆陶组主力油层连通性较好,连通系数可达到 0.4 以上,明化镇组下段油层连通性较差;断层发育、构造复杂开发单元油层连通性较差,连通系数普遍小于 0.3,而构造简单,位置有利的开发单元油层连通程度较高。

2 研究对策

2.1 河道砂岩岩性油气藏成藏机理

该区上第三系明化镇组地层中的河道砂体油藏厚度较小(5~15 m)、宽度较窄(200~300 m)、延伸短(1~2 km),主要集中在明Ⅱ、明Ⅲ、明Ⅳ油组,在马棚口断层以南广泛发育。河道砂体油藏主要受背斜构造背景、断层及砂体控制。一方面,马棚口断层以南明Ⅲ、明Ⅳ油组为继承性背斜、断鼻构造背景,使得该区河道砂体圈闭高部位远离北侧马棚口断层,为油气运移指向区;另一方面,马棚口断层、港 203 井断层与明Ⅲ、明Ⅳ油组河道砂体在空间上形成良好配置,断层沟通油源,使得来自下第三系的油气通过断裂网络通道幕式充注进入上第三系,并首先在馆陶组下段内稳定分布的块状砂砾岩中聚集,在浮力作用下油气通过次一级断裂网络再次运移到上第三系明化镇组的砂体高部位聚集形成油气藏,构成“网毯”式油气成藏体系(图 1)。明Ⅱ、明Ⅲ、明Ⅳ油组河道砂体油藏整体上为一受构造背景和断层控制的河道砂体岩性油气藏。

2.2 河道砂岩岩性油气藏研究方法

该区河道砂体多呈条带状分布,河道窄,厚度较小,横向变化快,砂体定量描述难度大,经多次试验,采用多种技术,制定了以下研究思路:在精细地层对比基础上,将出油井点的出油层位归位,进行精细层位标定,找到反映河道砂体的地震层位和敏感属性,

利用分频处理分析技术扫描河道砂体的轮廓和分布范围,应用三维可视化技术对有利地质体精细刻画,根据出油砂体进行外推,确定有利含油砂体的宽度和厚度,优选有利部位部署井位。研究过程中充分应用地球物理新理论、新技术,并在深入分析以往河流相储层研究成果的基础上,分别运用以点带面法和以面促点法开展综合性的研究工作。

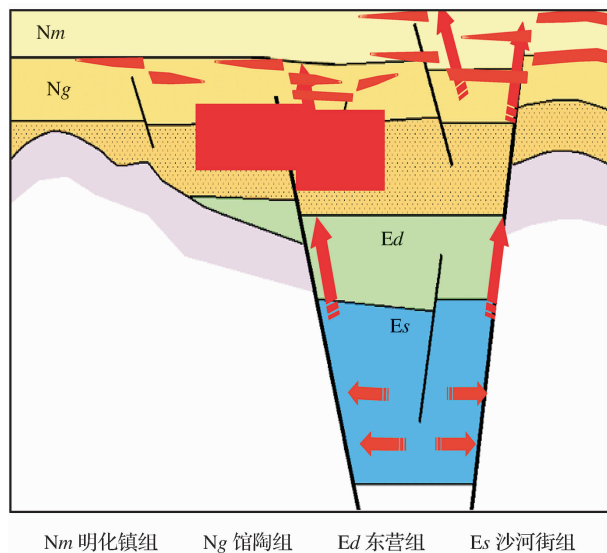


图 1 港东地区明化镇组(Nm)、馆陶组(Ng)浅层网毯式油气聚集模式

2.2.1 以点带面法

筛选已有的完钻油井,确定有利的井点或井组在平面上的分布特征,精细标定追踪河道砂体的地震反射特征,采用属性预测和三维可视化技术预测河道砂体的空间分布特征及范围。

2.2.2 以面促点法

对各油组小层采用闭合差速度法进行精细的层位标定(图 2),消除了频散的影响。对各小层在遵循等时追踪原则的基础上精细解释各个界面,形成与各小层对应的等时界面,针对各小层地层,在地震数据体上通过选取适当的时窗定性地假设地层在地震数据体上的时间厚度^[4-5],利用分频解释技术,研究目的层段的地震数据体振幅谱与地震频率之间的调谐关系,形成调谐数据体,对调谐数据体进行叠加成图处理,形成频率域对应的振幅谱平面特征图,将不同厚度砂体对映的频率平面图与已有单井分析结果开展匹配性分析,确定有利的河道砂体目标。在以上研究的基础上,最终应用三维可视化技术在三维空间雕刻出河道砂体的空间特征,通过成图手段在平面上得到砂体的分布范围及厚度变化特征。

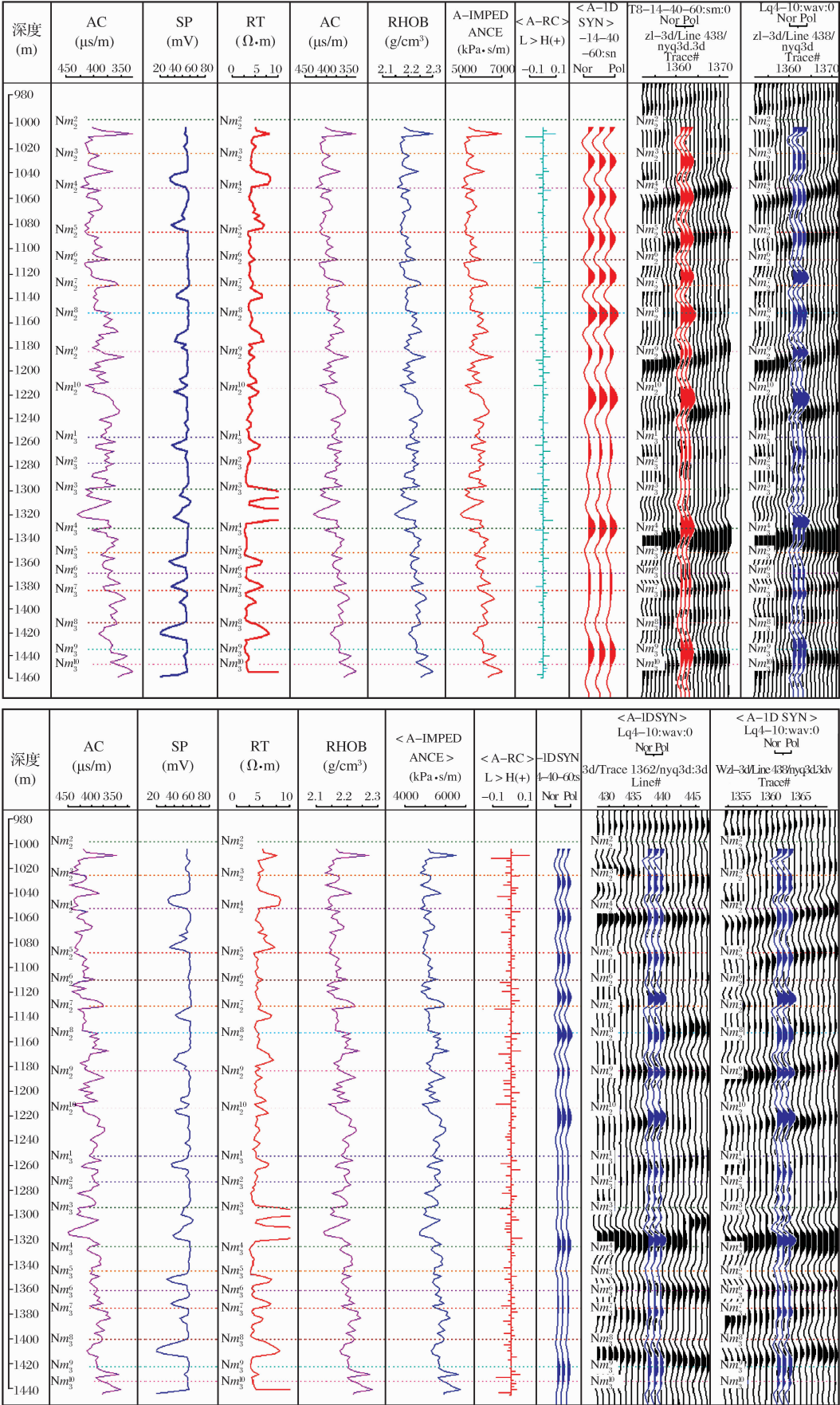


图 2 闭合差速度校正前(上)后(下)合成地震记录

3 河道追踪识别关键技术

3.1 高分辨率层序地层对比技术

随着油气勘探开发对储层预测精度的要求越来越高,以岩心、钻/测井、三维地震资料为基础的高分辨率层序地层理论与分析技术为四级层序内部不同沉积环境内高频层序的构成模式研究和砂体分布精细预测提供了可能性^[6]。为了建立更为精细的地层格架,本区在划分小层内部沉积单元时,以小层顶底界作为对比标志,依据河流砂体旋回的特征,寻找出相对稳定的旋回界限作为沉积单元分界;以相对稳定、自然可分的单一旋回层的数目作为小层内沉积单元的个数,不管是小层或沉积单元对比,均按地层对待,给出连续界限(包括砂和泥)。

港东明化镇组曲流河沉积中主要微相类型是曲流砂坝,垂向上岩性由粗变细,电测曲线表现为钟形,齿化钟形,反映砂坝粒度向上变细的正旋回特征。

馆陶组垂向上河道砂多期叠加而形成砂岩粒度相对较粗的厚砂层,剖面上砂多泥少,因此电测曲线表现为齿化箱形,间夹低幅齿化曲线组合;在非主河道沉积区,砂层相对变薄,间夹泥岩变厚,曲线为箱形或箱形—钟形组合形式。

根据河流相沉积特征,以及不同相带在平面和剖面上的配置关系,形成了4种相控对比模式:①河道渐变型模式;②河道溢岸型模式;③孤立河道型模式;④叠加型砂体模式;

明化镇油组小层厚度一般在15 m以内,形成一个四级正旋回,内部可以进一步划分2~3个五级旋回;在单层划分阶段,以平面上、纵向上尽量保持一个油藏为原则,做到一套油水系统不劈层,2套油水系统不合层。

馆陶油组由于垂向上河道砂多期叠加而形成厚砂层,四级旋回一般厚度小于20 m,内部形成2个五级旋回。

3.2 构造精细解释技术

利用新采集的高分辨率三维地震资料,对港东油田马棚口断层上升盘进行构造精细解释。由于港东地区构造主体很复杂,明化镇组、馆陶组河流相储层薄、岩性变化快,地震波组特征不明显,构造解释非常困难。因此在制定构造解释方案时,综合地震、钻井、测井、试油、试采、开发动态等资料,利用振幅属性、相干体及频率等多属性提取技术按等时追踪的原则,对马棚口断层上升盘的明Ⅱ油组底界、明Ⅲ油组底界、明Ⅳ油组底界、馆Ⅰ油组底界、馆Ⅱ油组

底界、馆Ⅲ油组底界进行精细构造解释,解释测网密度为100 m×100 m,局部加密到50 m×50 m。之后对明、馆的地层在地震资料可分辨的基础上针对每一个可分辨的地震同相轴进行垂向加密解释。为下步针对河道砂体开展储层地震属性分析和精细的分频解释及三维可视化研究打下了坚实基础。分析各小层内部砂体的变化情况,共加密解释了 Nm_2^8 、 Nm_3^4 、 Nm_3^8 、 Nm_4^3 、 Nm_4^8 、 Ng_2^3 、 Ng_3^4 共7个小层顶界。

3.3 地震模型正演技术

如果说地震反演搭建了测井与地震之间的桥梁,那么地震正演技术则连接了地质与地震之间的沟通^[7],通过设计不同背景下的地质模型,得到不同激发条件下的地震响应,可以客观地评价地质解释方案,明确地质体与地震响应间的关系,准确预测和解释地震剖面上的地质体成因,提高储层预测的精度和成功率,降低解释的多解性。根据统计,明化镇组泥岩速度区间集中在2 900~3 000 m/s,砂岩速度区间主要集中在2 700~2 800 m/s;泥岩密度区间主要集中在2.3~2.4 g/cm³,砂岩密度区间主要集中在2.1~2.3 g/cm³。

根据港东地区明化镇组河流相储层河道结构具有“泥包沙”的特点,我们设计了河道砂体的地质模型,模型内有5个单河道砂体,厚度分别为10 m、8 m、6 m、4 m、2 m,泥岩速度设为2 950 m/s,密度为2.35 g/cm³;河道砂体的速度设为2 750 m/s,密度为2.2 g/cm³。

通过模型正演,结合地质、测井及岩心分析,针对港东地区河流相储层研究解决了以下问题:①薄层储层的地震响应问题,因为本区河流相储层厚度大多小于10 m,3~5 m储层在常规地震上的响应是识别薄储层的关键;②通过对地震分辨率的研究,确定了砂体的最大可识别性问题。

3.4 分频处理技术

实际的地震波信息是地下多个砂泥岩薄互层在时间域产生的复杂调谐反射的综合响应^[8]。地震分频处理技术是一种基于频谱分析的全新地震成像解释方法,每个薄层产生的地震反射信号经离散傅叶变换后,在频率域都有一个与之相对应的特定频率成分,且这种频率成分在频率域是唯一的。采用地震分频处理技术识别地质异常体进而预测储集层,可以彻底摆脱仅依赖振幅类以及振幅衍生类地震属性信息进行储集层厚度、物性预测以及烃类检测的束缚,同时也可弥补由于地震采集、处理时振幅不一致导致的地震地质解释的多解性,它可以整体揭示

地层的纵向变化规律、沉积相带的空间演变模式,并能指导人们进行储集层厚度展布的描绘与分析、单砂体级别薄互层的定量检测,还能够对整个研究区的薄层时间厚度和地质体的非连续性进行检测,进一步提高储层预测的精度。

在对港东油田马棚口断层上升盘明化镇组、馆陶组油组进行河道砂体追踪预测研究中,针对河流相储层砂泥岩互层复杂多变的特点及地震资料品质先天不足的客观条件,采用地震分频处理技术开展储集层预测,识别薄层时间厚度的变化,使得对薄层厚度的估算更加准确,识别横向上地层的非连续性,如层间小断层、裂隙及沉积相带变化,获得了很好的效果。

3.5 三维可视化技术

如果把三维地震数据转换成可以看见的直观对象,并以一目了然的方式显示出来,则可以充分发挥人的形象思维能力来理解这些数据所蕴涵的地质意义,这是三维可视化所追求的目标^[9]。采用三维可视化技术则可以使地震数据达到更完美、更直观的效果。

在三维可视化环境下,对三维反射面的追踪要容易得多,那些片面的、孤立的信息在三维空间中能互相联系起来,形成一幅有成因联系的沉积体系或构造体系图。应用 Geoprobe 软件对马棚口断层上升盘明化镇组、馆陶组油组进行河道砂体追踪取得了较好的效果(图 3)。

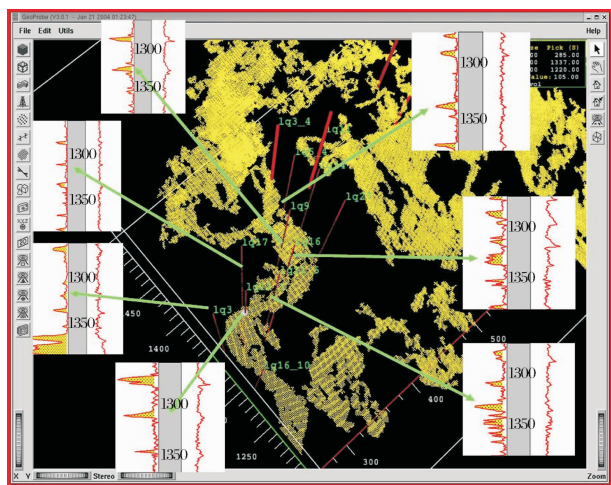


图3 明化镇组河道立体技术追踪效果

4 应用效果分析

在常规的地震资料解释方法中,往往根据解决构造油气藏的方法,把同相轴有变化和尖灭的地方当断层处理,而实际中纵向上相邻较近,砂泥交又叠置的砂体在地震上很难区分开,出现从地震上相连而开发上油水关系矛盾的现象。为解决此类问

题,研究中运用以点带面法、以面促点法相结合的思路,充分应用新理论、新技术开展研究,对于一些油层分布比较落实的井区采取以点带面的方法;而对于大部分地质认识不太清楚的地区采取分频解释技术预测河道砂体的分布特征,然后与周边井进行储层匹配预测河道砂体的平面分布特征,在实际应用中取得了明显的地质效果(以港浅 8-6 井区为例)。

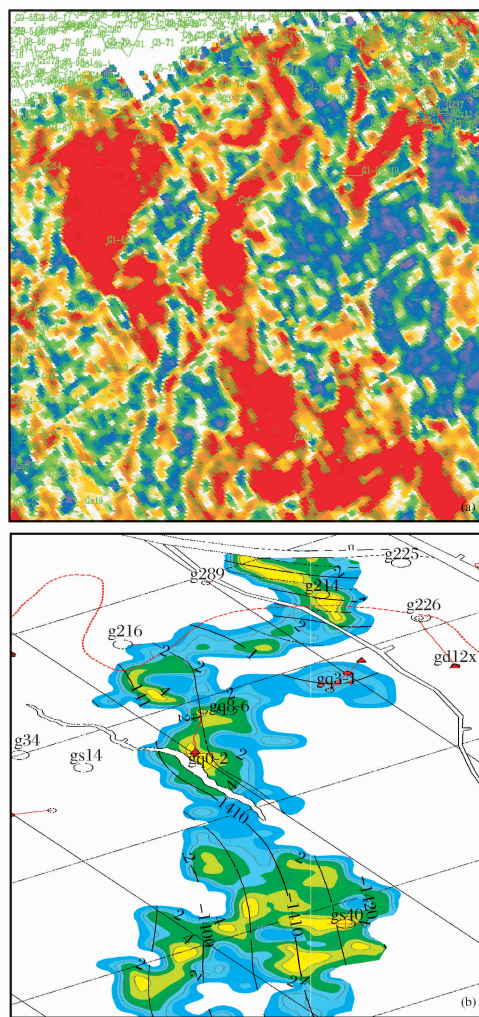


图4 港浅 8-6 井区地震分频扫描(a)
与实际河道砂体对比(b)

4.1 港浅 8-6 井区地质特征

港浅 8-6 井区位于马棚口断层上升盘,西至马浅 4-4 井,东至港 203 井断层上升盘,南起港深 40 井,北至马棚口断层上升盘,面积 12 km²。井区内共有各类探井 22 口,开发井 34 口,该井区明Ⅲ₄、明Ⅲ。砂体整体构造背景为依附于马棚口断层上升盘的背斜构造背景,明Ⅲ、明Ⅳ及馆陶组砂岩发育,纵向上厚度薄,平面上宽度窄,分布较稳定,油层厚度一般在 5~15 m,属于典型的曲流河道砂体控制的隐蔽岩性油气藏。

4.2 应用以点带面、以面促点法预测河道砂岩

在精细地层对比、借鉴以往研究成果分析的基础上,将出油井点的出油层位归位,进行精细层位标定,找到河道砂体的地震响应,对明Ⅲ₄小层开展精细构造解释,确定合理的时窗,利用分频处理解释技术对明Ⅲ₄小层地层对应的地震数据体分频处理,得到不同频率对应的不同厚度砂岩调谐能量数据体,分析调谐能量的高值区发现港浅8-6井区的河道砂体分频处理结果与已钻井证实的砂体分布特征吻合度高。从而证实分频解释技术在该区河道砂体的预测和追踪工作中具有很强的适用性和可靠性(图4)。

5 结论

(1)以点带面法和以面促点法的对比分析。对于已经有一定认识的河道砂体,在单井或井组砂体分布特征比较明确的区域,应用以点带面法能够更有针对性的开展工作,目的性明确,直接切入目的层。缺点是前期的研究内容必须准确可靠,同时研究视野受到一定的局限性影响,对整体研究不详尽。以面促点法主要采取分频解释技术,是一种全新的研究理念,将研究的内容由以往传统的三维地震数据研究方式,向四维频率域转换,该方法主要基于地震资料构造精细解释和分频处理分析,在地震分频解释技术研究成果平面图的指引下可促进单井点的对比研究工作,得到研究区域平面上的连续分布特征。在此基础上类推其他河道砂体的分布情况,从而达到平面预测河道砂体的目的。缺点主要包含2个方面:一是层位追踪方式必须遵循等时的原则,解

释结果要覆盖目标区,解释工作量比较大;二是对于砂泥薄互层储层来讲,要想分辨薄层砂岩,三维地震资料要具有“三高一宽”的特点。

(2)形成了一套适合河道追踪的技术。在实际应用的基础上,成功地探索出了一套应用高分辨率层序地层分析技术、精细构造解释、地震属性分析、分频解释、三维显示等技术为核心的河道砂体精细描述技术,并利用此项技术通过该区的已知含油气井,外推其含油气砂体范围,发现了一系列有利砂体圈闭。

参考文献:

- [1] 窦松江,周嘉玺. 复杂断块油藏剩余油分布及配套挖潜对策[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 90-93.
- [2] 石占中,张一伟,熊琦华,等. 大港油田港东开发区剩余油形成与分布的控制因素[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 79-82, 86.
- [3] 尹艳树,翟瑞,吴胜和,等. 综合多学科信息建模——以港东开发区二区六区块储层微相三维分布模型为例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 408-411.
- [4] 陈广军,张善文. 对地震资料应用中几个常见问题的思考[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(1): 115-121.
- [5] 李海亮,张丽萍,黄云峰,等. 合成记录在层位标定中的应用[J]. 西北油气勘探, 2005, 17(3): 41-46.
- [6] 邓宏文,王红亮,王居峰,等. 层序地层构成与层序控砂、控藏的字相似特征[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 491-495.
- [7] 唐建明,杨军,张峭楠,等. 川西坳陷中、浅层气藏储层识别技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 879-893, 894.
- [8] 王大伟,刘震,赵伟,等. 陆相油藏中砂泥岩互层时移地震遮掩效应及其对时移地震资料解释的影响[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 635-640.
- [9] 罗忠辉,郑爱萍. 三维可视化环境下潜江凹陷 E_{q3}⁴ 砂体展布规律研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(5): 32-34.

Application of Channels Tracing and Prediction Technique to Fluvial Facies Sand Bodies in Gangdong Exploitation Area

MU Zhi-quan^{1,2}, ZHOU Li-hong², PU Xiu-gang², CHANG Hong²,
ZHAO Shi-min², LIU-Yi², SUN Wei-hong²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: The Minghuazhen Formation and Guantao Formation of Gangdong exploitation area are fluvial facies deposits. Based on 3-D seismic data and fine-division layers of the Formations by high-resolution sequence technique, the seismic response characteristics of reservoir sand layers are defined. Sub-layers are interpreted according to the sequence-contrasting law. The distribution range of channels is traced using the advanced spectrum decomposition processing-interpretation technique and 3-D vision technique. The results of calculation and real drilling data are matched well by using the methods of point-controlling-surface and surface-directing-point. The practical geological effects are very satisfactory.

Key words: Fluvial facies; Fine layer calibration; Spectrum decomposition; Channels tracing; Gangdong exploitation area.