

川西 DY 地区须家河组致密砂岩储层预测技术 及应用效果分析

谯述蓉, 张虹, 赵爽

(中国石油化工股份有限公司 西南油气分公司 石油勘探开发研究院 德阳分院, 四川 德阳 618000)

摘要:以储层标定为基础、储层波形特征分析为核心、地震反演处理与解释为主要手段、多种技术联合应用的储层综合预测方法。运用此技术查明了川西 DY 地区主力储层须家河组二段、须家河组三段的砂体具有厚度大、含气性较好、横向上分布稳定的展布格局,总结了须家河组二段、须家河组三段储层的有利反射波形特征为低频弱振幅,提出了勘探、开发部署地震选点模式及一批勘探、开发评价井位,经实钻证实预测成果可靠,钻探效果十分明显。

关键词:波形特征;分频特征;地震反演;致密砂岩储层;储层预测;须家河组;川西 DY 地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir prediction techniques and their application to tight sandstones of the Xujiahe Formation in DY area, western Sichuan Basin

Qiao ShuRong, Zhang Hong, Zhao Shuang

(Deyang Branch of Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Southwest Company, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: This paper presents an integrated reservoir prediction method which takes reservoir calibration as its basis, wave character analysis as its core and seismic inversion processing and interpretation as its major tools and joint application of various technologies as its feature. Its application in the study area reveals that the sandstones in the second and the third members of the Xujiahe Formation have great thickness, favorable gas-bearing properties and stable lateral distribution. According to the study results, low frequency and weak amplitude are considered favorable seismic reflectance signatures of the reservoirs in the two members of the Xujiahe Formation. A model for seismic-based placement of exploration and development well is put forward and several appraisal well locations for exploration and exploitation are proposed. Drilling results prove that the predictions are quite reliable and trustworthy.

Key words: wave character; characteristics of frequency division; seismic inversion; tight-sand reservoir; reservoir prediction; Xujiahe Formation; western Sichuan Basin

1 地质背景

川西 DY 油气勘探区区域构造位于龙门山冲断带前缘隐伏构造带南段,东南为成都凹陷,西北为雾中山构造,北东与金马-鸭子河构造斜列相接,南西与邛西、平落坝构造斜列相接;北段发育有中坝、安县等局部构造;中段有鸭子河、金马等

局部构造;南段则发育有包括 DY 构造在内的邛西、平落坝等局部构造,均为含油气构造。由于本区受到北西侧强烈挤压应力影响,引起剧烈褶皱,并使地表及地覆出现了较大规模的推覆式逆断层, DY 构造正处于在两条西倾的逆断层之间,构造以变形为主。

DY 构造所在的前缘隐伏构造带主要形成于印支晚期, DY 构造的形成与源自龙门山深部基底

收稿日期:2008-03-04。

第一作者简介:谯述蓉(1963—),女,工程师,构造解释及储层预测。

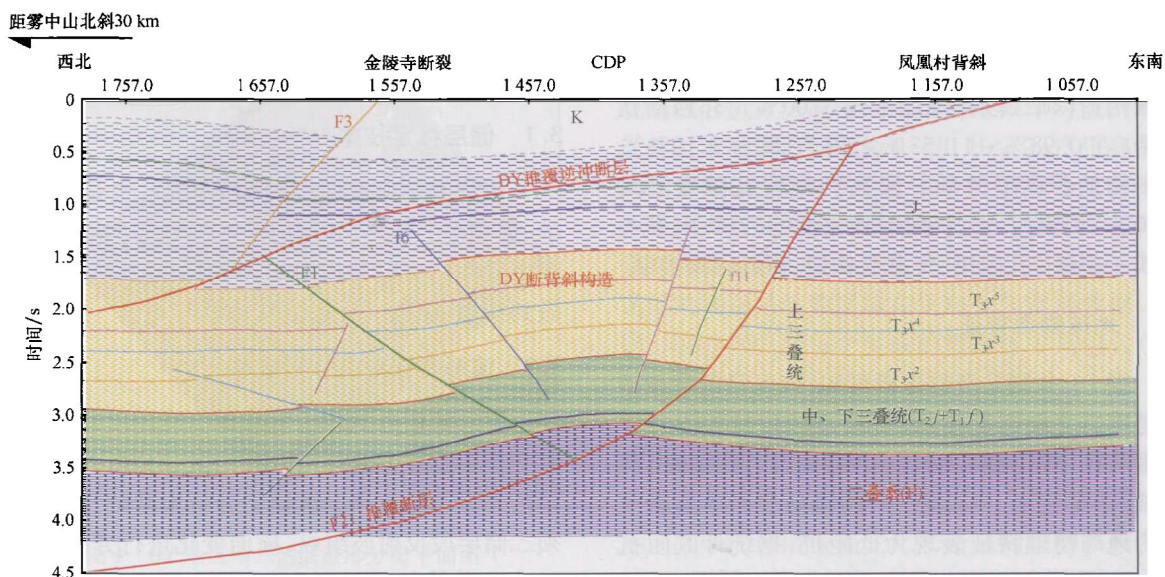


图1 川西DY构造样式地震解释剖面

Fig. 1 Seismic interpreted structural styles in DY area, western Sichuan Basin

的逆冲断层向东推移,形成雾中山断层相关褶皱,由于受喜马拉雅期构造运动和四川盆地阻挡影响,其断层发育后期呈后列式发展,雾中山背斜构造进一步隆升,前翼发生突破,形成金陵寺断裂逆冲至地表,部分位移量沿继续水平向前传递,在DY构造东翼向上逆冲至地表,形成地表所见的凤凰村背斜;深部隐伏的F2断层也是源自龙门山深部基底的逆冲断层经雾中山、金陵寺向前水平传递至DY地区受到阻挡沿断坡逆冲和反冲形成逆冲的F1断层和反冲的F2断层,两断层挟持地带形成了DY断背斜构造,实质上DY构造就是源自龙门山基底的逆冲断层往盆地方向逆冲推进过程中受四川盆地阻挡影响在断层消失部位形成的断层相关褶皱(图1,图2)。

2006年,在该区依据二维地震资料研究成果钻探D1井在须家河组须三、须二段获得工业气流。在此基础上,部署了满覆盖面积为254.0 km²的三维地震勘探工作。在坚持地震先行,地质、测井等多学科综合研究相结合,取得了可喜的进展。据此部署的D101, D2, D3, D4等勘探评价井,取得了良好的油气成果。

2 储层特征

2.1 地质特征

DY地区主要储层为中、上三叠系须家河组二

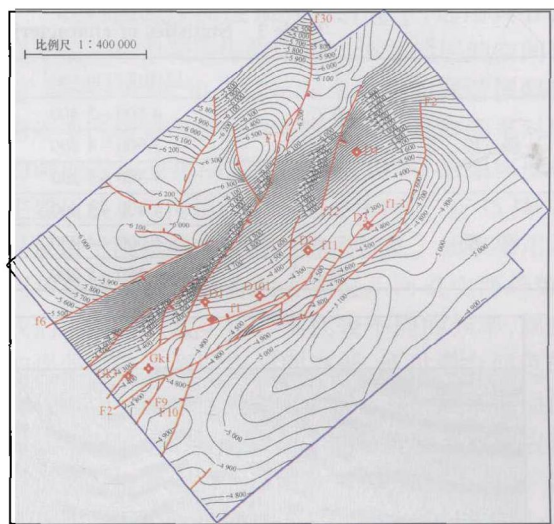


图2 川西DY地区须家河组二段顶界构造

Fig. 2 Top structural map of the second member of the Xujiahe Formation in DY area, western Sichuan Basin

段(须二段)、须家河组三段(须三段)。储层岩性为砂岩,属于三角州平原相和三角州前缘相叠置分流河道砂体。钻井资料揭示该区须二段、须三段储层厚度大、分布广,最大厚度超过280 m,是该区目前勘探发现的主要储集层。其主要特征为,砂岩石英含量高(75%),据岩石物性分析:孔隙度为1.31%~5.36%,平均2.70%,渗透率为 $5.51 \times 10^{-7} \sim 9.85 \times 10^{-5} \text{um}^2$ 。从区域上看,DY构造孔隙

度明显低于中坝构造(孔隙度平均 7.83%),低于平落构造(须二段孔隙度平均 4.18%),而与大兴西构造(须二段孔隙度平均 3.00%)、邛西潜伏构造(在 0.98%~11.53%之间,平均为 3.10%)、新场构造(X851 井须二段高产气段孔隙度平均 3.50%)大致相当。仍属于致密性的砂体,气藏类型属于裂缝-孔隙型,气藏受构造、裂缝因素控制。

2.2 地球物理特征

据 D1 井测井资料分析可知,该区目的层段砂岩与围岩之间的层速度、密度及波阻抗差异并不是很明显,对比围岩而言,储层具有“高速度、高阻抗、中等密度、中低伽马”的特征。而砂岩含气后的地球物理特征表现为低阻抗,据统计其阻抗特征与围岩(泥岩)相似(表 1)。储层识别难度大,需要采用多种技术手段对含气砂岩进行综合识别。

3 储层预测技术方法

3.1 储层标定技术

该技术是地震储层预测的基础,也是最常用的、最关键的技术,其目的是准确确定反射波组的地质属性、储层的地震响应特征。这一步重点是做到精细、准确。标定结果见图 3。

3.2 波形特征分类分析技术

波形特征分类分析包括目标层段反射形态的宏观分析及井旁地震道波形的微观分析。研究中根据井旁道标定和正演模型分析为基础,对须三、须二储层段反射波组纵、横向变化进行分析,能够反映地震波的运动学几何特征——地震波形分类。由于地震道波形是地震振幅、相位、频率的综

表 1 D1 井储层特征参数统计
Table 1 Statistics of characteristic parameters of reservoirs in Well D1

地层	层速度/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	波阻抗/[(m·s ⁻¹)(g·cm ⁻³)]
须三段	砂岩	4 500~5 400	2.42~2.61
	含气砂岩	3 900~4 800	2.42~2.72
	围岩	4 300~5 200	2.01~2.52
须二段	砂岩	4 400~5 600	2.43~2.64
	含气砂岩	4 000~4 950	2.35~2.72
	围岩	4 350~5 200	2.15~2.62

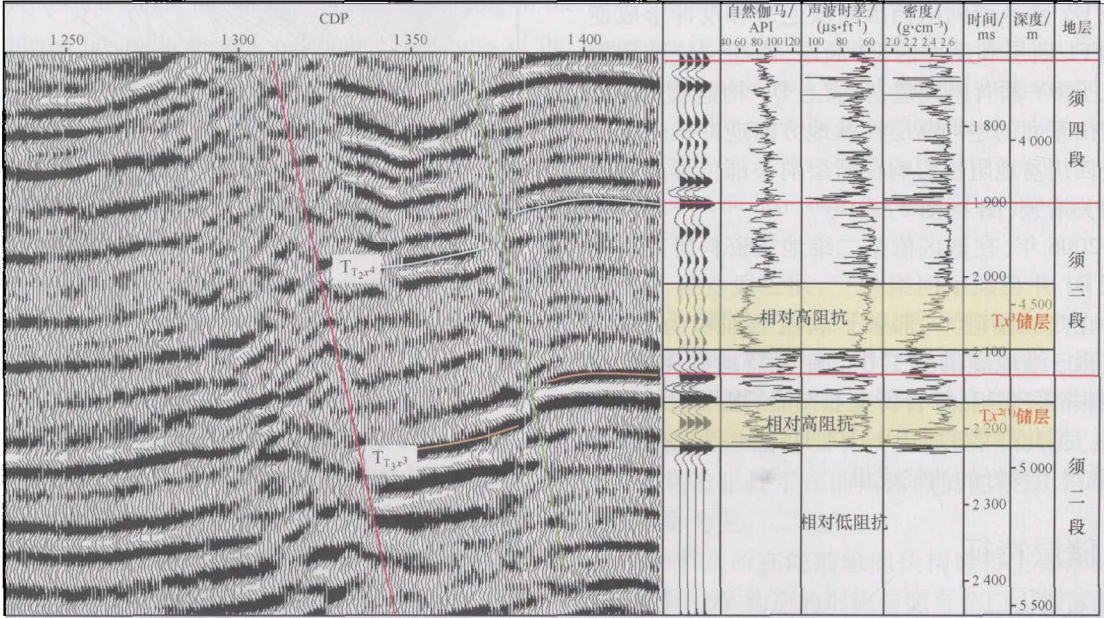


图 3 D1 井须三段、须二段储层标定

Fig. 3 Reservoir calibration in the second and third members of the Xujiahe Formation in Well D1

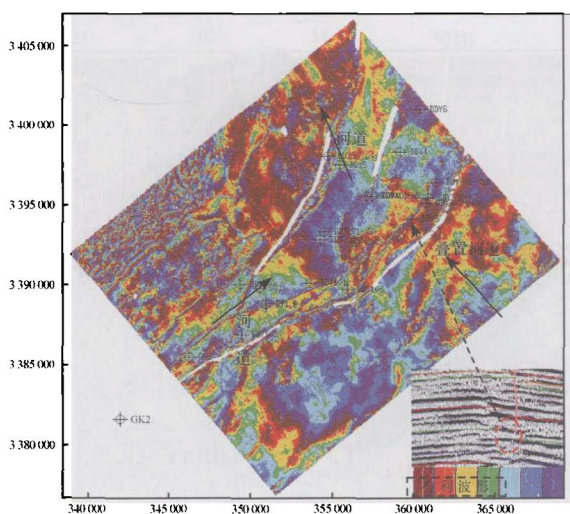


图4 DY地区须二储层波形分类平面图

Fig. 4 Planar map showing waveform classification in the second member of the Xujiahe Formation in DY area, western Sichuan Basin

合反应。波形分析不仅可用于岩性预测,还可以用于油气预测。岩性预测方面,波形特征、振幅属性均能客观地反应岩层的横向变化^[1,2]。找出异常反射段,然后通过钻井标定结果,确定地震异常所代表的地质含义(图4)。通过D1井的井旁道标定,按波形特征将反射波分为7类。从图4的平面特征分析,不难发现1至4类中等强度地震反射波形与河道砂体相对应,5至7类高频弱振幅的反射波形与泛滥平原沼泽沉积(泥岩)相对应。无论是须二段或是须三段均表现出多期叠置的河道特征。

3.3 分频分析技术

分频技术^[3]是利用付里叶变换,通过频谱分解来研究薄层变化的方法,实现了在频率域内通过调谐振幅的对应关系来研究储层横向变化规律,使地震解释可得到高于常规地震主频率对应 $\lambda/4$ 的时间分辨率结果。即经分频处理后的地震数据其解释分辨率高于常规地震主频所能达到的分辨能力。该项技术在确定含气砂体边界、估算地层厚度方面比传统地震属性研究方法具有更大的优势。分频解释技术的关键步骤:1)产生调谐体,调谐体是沿研究目的层面,或对两层之间进行短时窗离散傅立叶变换,生成在垂向上频率连续变化的振幅数据体,它表示在相同的研究时窗内,

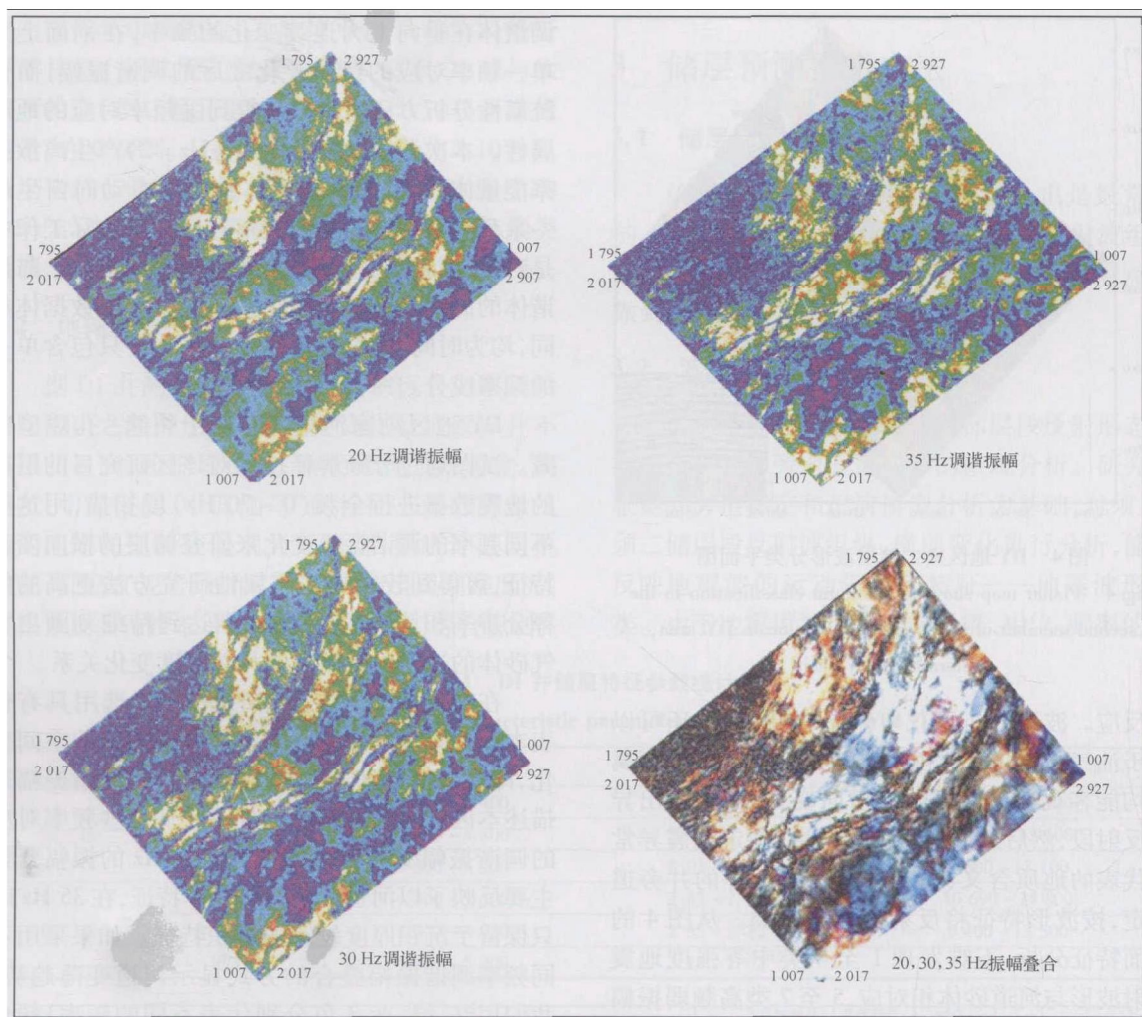
调谐体在垂向上为连续变化的频率,在平面上为单一频率对应的经归一化之后的调谐振幅,而传统属性分析方法通常只能得到主频率对应的地震属性。本次调谐频率为0~70 Hz。2)产生离散频率能量体,离散频率能量体是沿短滑动时窗生成一系列离散频率的调谐振幅数据。在实际工作中是对有针对性的频率产生离散频率能量体。与调谐体的区别是该数据体在垂向上与常规数据体相同,均为时间,但每个生成的数据体中只包含单一的频率成分。

DY地区须家河组气藏属于裂缝-孔隙型气藏。试图通过分频解释技术对该区研究目的层段的地震数据进行全频(0~70 Hz)段扫描,用这些不同频率的调谐振幅变化来研究储层的横向变化特征,可得到较常规地震属性研究方法更高的解释分辨率和清晰的图像,以期达到精细刻画出含气砂体的边界以及砂体的相对厚度变化关系。

在对该地区储层预测的研究中,选用具有代表本区的频率调谐振幅来描述该区储层的空间变化,即用10,20,30,35 Hz频率对应的调谐振幅来描述本区储层的横向展布规律。从这些频率对应的调谐振幅变化结果来看,10,20 Hz的振幅变化主要反映了以河道沉积的厚砂体特征,在35 Hz时只保留了沉积厚度较薄的沉积特征。如果采用不同频率调谐振幅叠合的方式显示河道变薄趋势,我们用红、绿、蓝3色分别代表不同的频率,颜色的强弱对应着调谐振幅的高低,通过混合颜色的变化来描述储层空间变化细节。这种表征储层的方法与卫星遥感技术采用不同带宽频率对地表地形地物扫描产生的干涉图象解释方法相类似。图5为须二砂体与20,30,35 Hz对应的调谐振幅,分别用红、绿、蓝三色叠合表示的结果,图中的浅色对应厚储层,颜色变深表示储层厚度变薄,背景色黑色为非储层,图中刻划出来的储层厚薄横向变化关系比单一频率更加清楚、完整,细节更加丰富。尤其是河道叠置情况,比常规地震属性表现更为清楚,该砂体向北东方向延伸应该还有相当大的规模,因此,须二段油气前景应该看好,而且向北延伸的趋势十分明显。

3.4 含气性检测技术

在DY地区须二、须三段砂体非常发育,即砂体不是耽心的重点,但砂体相对致密,裂缝是其高

图5 须二(T_3x^2)储层分频特征Fig. 5 Frequency division of the second member in the Xuejiahe Formation(T_3x^2)

产富集带的关键影响因素,因此,物性及含气性检测是目前储层预测的重要内容。

1) Proni 滤波识别储层含气性^[5]

地震波在传播过程中的吸收衰减是一个与岩性、含气性相关度极高的参数,应该说远远超过了速度参数对油气的反映。长期以来,研究储层的吸收性能一般采用傅氏变换的方法,但由于傅氏变换是将信号分解为调谐波,且以线性方式求取目的层段相对的平均吸收率,从而制约了预测精度。为克服傅氏变换的不足,Proni 变换是采用阻尼谐波分解信号及非线性滤波方法,直接求取目的层吸收系数,描述频率与吸收衰减系数间的关系,以提高储层含气性预测的精度。因此,可作为检测吸收衰减异常带和预测储层含油气性的手段。

Proni 吸收滤波技术采用了非线性的变换方法,它可以有效的分离高频信号,处理结果大大增加了地震资料的纵向及横向分辨率。特别是吸收滤波技术增加了衰减分量,其结果可有效地显示出高频能量衰减异常带,区分具有不同吸收特性的介质。该技术可以将含气储层吸收信息予以放大,尤其是对于含流体储层而言,因含气往往在地震剖面形成杂乱弱反射,而用常规振幅对该杂乱反射的边界不易确定,异常不够突出,通过 Proni 吸收滤波处理则易于确定明显吸收带,放大弱反射乃至空白反射信息,提高预测精度,达到预测目的。D1 井须二、须三产层段高频吸收明显(图6),地震波高频吸收强烈,尤其是产气的吸收明显,地震反射呈现空白反射。通过 Proni 滤波结果,只剩

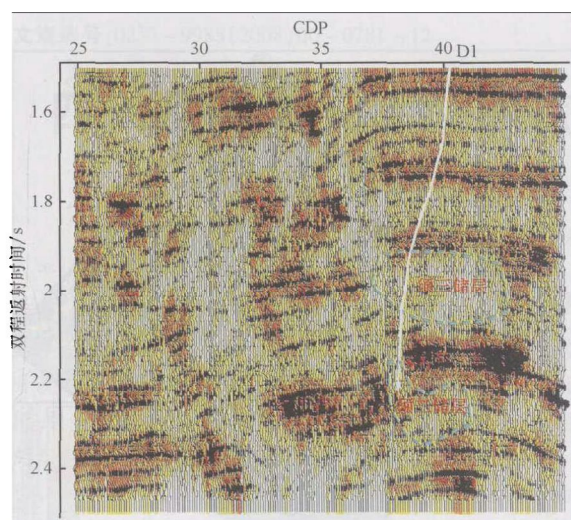


图6 D1井 Proni 吸收滤波油气检测剖面

Fig. 6 Profile of hydrocarbon detection through Proni absorption filtration in Well D1

下低频部分信息,这种异常可能意味着是储层因含流体造成地震波吸收的地震响应。

2) 子波重构法识别含气性^[6,7]

在地震纵波勘探中,不同频率的地震反射波特征揭示不同的地下地层岩性、物性及其含流体性。所谓多子波重构就是基于这种思想,提供一种途径,允许研究人员针对自身感兴趣的地质异常,选择不同频率的单一地震子波或者子波段,重新组成新的地震剖面和数据体,提取精度更高的频率各向异性、吸收与衰减等地震属性参数,提供更可靠的流体识别参数。并以此来达到检测和突出研究对象、寻找研究异常的目的。使用基于多子波重构技术,对多子波重构处理后的地震数据体,进行频谱计算及频谱含气吸收衰减分析。为了有效确定针对该地区目的层段的子波重构频段范围,研究中以已知井进行标定,以 D1 井的须二气藏频谱特征为依据。因为 D1 井在该层段钻遇较好砂体,为含气性较好的一类井。以其他类异常部署的 D2, D3, D4, D101 井,正好是该方法适用性的一批检验井,分析认为,通过重构处理,最终确定选择对多子波分解数据体,进行 8~25 Hz 的子波重构来寻找低频弱反射带的有利储层,可据此预测与 D1 井特征相似且含油气性较好的地区。理论上,特别是当储层含气后,对地震反射波中的高频成分吸收明显,使其高频成分急剧衰减,而产生高频成分“缺失”、能量弱、且有明显的空白带异

常。图 7 是 D1 井须二储层段频谱吸收衰减异常特征,可以发现 D1 井由于含气性好,它的高频吸收衰减特征明显,说明通过多子波分解与重构后的数据体,得到的吸收属性异常图,不仅特征较常规数据吸收异常图清晰,特征更明显,其物理意义和地质含义也比较明确,可以用来预测有利的含气区域, D3, D101, D4 井的须二异常级别比较高,预测获工业气流的希望较大(图 8, 图 9)。

3.5 综合预测评价

以分频振幅异常、波形分类特征、吸收滤波因子、频谱特性等多属性异常参数,建立起该区储层及含气检测的地震预测模式^[8]——“低频、高吸收、强衰减、弱振幅”,再结合构造特征,占据构造有利位置及裂缝相对发育带为原则。对 DY 地区须二 $T_x^{2(1)}$ 储层、 T_x^3 储层进行了综合预测,预测结果表明,在构造轴部一带油气富集区分布范围大,主要呈条带状分布,富集区两层叠合后面积达 112.2 km²,有利区两层叠合后面积达 154.8 km²。由此表明, $T_x^{2(1)}$ 层、 T_x^3 层在该区均可能形成良好的储层。在此区域内, D1 井在须二 T_{3x}^2 储层井段进行网络裂缝酸化测试,获无阻流量 51.6×10^4 m³/d 的高产工业气层,在须三 T_x^3 层获天然气无阻流量 12.0×10^4 m³/d。

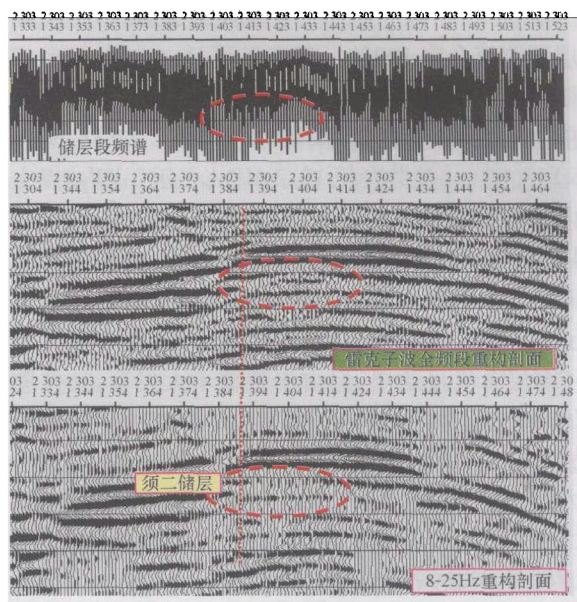
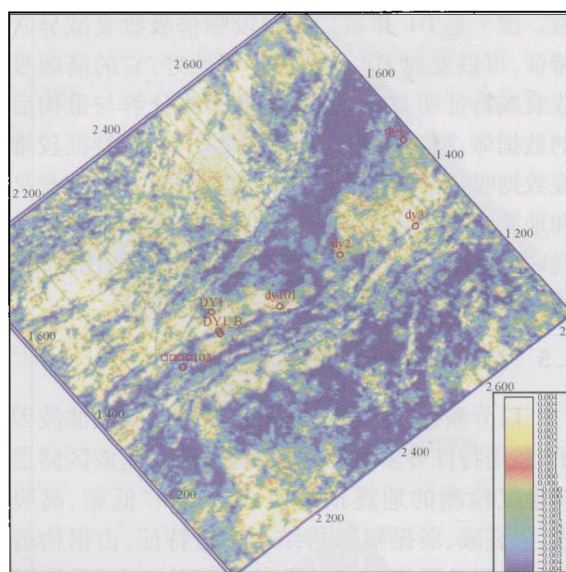
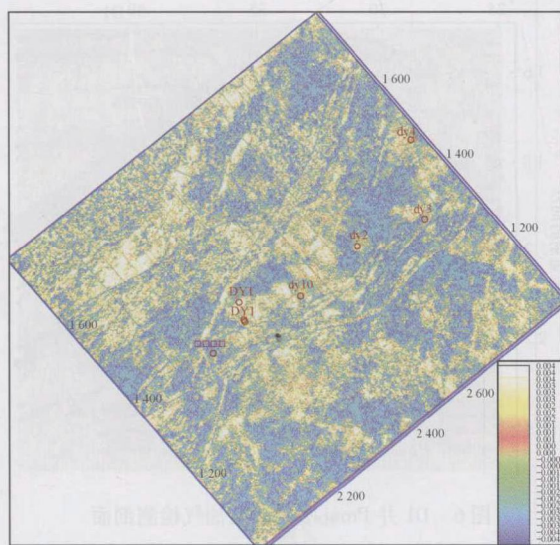


图7 D1井须二储层频谱吸收异常特征

Fig. 7 Abnormal spectral absorption in the second member of the Xuejiahe Formation in Well D1

图8 须二($Tx^{2(1)}$)储层段高频吸收异常特征Fig. 8 Abnormal high-frequency absorption in the second member of the Xuejiahe Formation($Tx^{2(1)}$)图9 须三(Tx^3)储层段高频吸收异常特征Fig. 9 Abnormal high-frequency absorption in the third member of the Xuejiahe Formation(Tx^3)

4 预测效果分析

利用上述预测技术和方法对研究程度相对较低的DY地区须家河组储层进行了综合预测,取得了丰富的地质成果,并依据此模式部署的D101, D2, D3, D4井4口探井,均钻遇到了预测砂体,储层预测符合率100%。截至发稿日,4口井已经完钻,目前正在对该批井进行系统测试该造工作。单从钻、录井资料揭示,D4井的须二5 813.50 ~ 5 813.89 m,关井套压12.2 MPa,立压0 MPa,点火火焰呈桔黄色,火焰高20 ~ 30 m;D3井的须三4 584 ~ 4 592 m,放喷点火,火焰高12 m,阶段初测天然气无阻流量 $13.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。须二也钻遇到了非常好裂缝发育带,D2井在设计目的层尽管见到了多层含气显示层,但由于裂缝不太发育,该井整体油气显示欠佳;D101井须三段4 547 ~ 4 564 m,放喷点火,火焰高约5.0 ~ 8.0 m,桔黄色,上流压力稳定在4.4 ~ 4.6 MPa,初测天然气无阻流量 $1.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,对比D1井的须二在钻探过程中的油气显示情况(钻探过程中显示仅超过 $500 \text{ m}^3/\text{d}$,完钻改造后获无阻流量 $51.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),大大地超过了钻前预期,可见,除D2井以外,D101, D3, D4井完钻测试有望获得工业气流,预测效果令人满意。

5 结论

几年来,经过不断地摸索,在川西须家河组致密储层的预测和含气性检测方面,形成了相应的配套方法和关键技术,尤其是在DY地区的地震预测模式,将在今后该地区的勘探、开发中发挥更重要的作用。

参考文献

- 1 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京:石油工业出版社,1982. 334 ~ 341
- 2 黎文,周志才,吴焱. 用地震剖面划分沉积微相[J]. 石油物探, 2000,39(1):57 ~ 62
- 3 赵爽,李仲东,许红梅. 分频解释技术及其在陆相砂岩地层地震勘探中的应用分析[J]. 矿物岩石,2006,26(2):106 ~ 110
- 4 何晓菊,郭亚斌. 鄂尔多斯盆地苏里格庙地区上古生界砂岩储层预测技术和效果[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(增刊):10 ~ 13
- 5 李来运,蒋加钰,杨宝泉. Prony滤波方法及其在应用[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(4):409 ~ 414
- 6 赵爽,李仲东,许红梅,等. 多子波分解技术检测含煤砂岩储层[J]. 天然气工业,2007,27(9):44 ~ 47
- 7 郑荣才,叶泰然,翟文亮,等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测[J]. 石油与天然气地质,2008,29(3):405 ~ 411
- 8 兰素清,陆明华. 多种地球物理方法组合在储层预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展,2002,26(6):43 ~ 46

(编辑 高岩)