

地震分频技术在扇三角洲前缘砂体预测中的应用

——以海拉尔盆地乌尔逊断陷铜钵庙断裂带南屯组为例

王江¹, 陈沫¹, 王杰¹, 刘霜², 周豪³

1 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院; 2 中国石油大庆油田有限责任公司采油一厂;
3 中国石油新疆油田公司采油一厂

摘要 海拉尔盆地乌尔逊断陷构造复杂、断裂发育,发育扇三角洲前缘含油砂体。针对含油砂体分布范围小、厚度薄、预测难的问题,通过地震匹配追踪分频处理,得到频率域的离散调谐地震数据体,其地震剖面波形特征清晰、能量增强、分辨率提高。应用优势频率分频三维地震资料,精细刻画了铜钵庙断裂带南屯组扇三角洲前缘砂体的三维轮廓和有利储层分布,并通过综合分析认为铜钵庙断裂带受东部物源控制,发育扇三角洲—湖底扇—半深湖(深湖)沉积体系。该技术的预测结果符合地质规律,与钻井结果的吻合度较高。

关键词 地震分频技术;地震属性;储层预测;铜钵庙断裂带;乌尔逊断陷;海拉尔盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码**:A

0 前言

海拉尔盆地为中、新生代的多旋回、叠合式、断-拗转型盆地^[1],盆地经过多期改造和建造,断裂发育、构造复杂。乌尔逊断陷位于海拉尔盆地中部断陷带,中石油第四次资源评价的资源量为 2.52×10^8 t,现已提交探明储量累计 0.38×10^8 t,探明率仅为15.1%,表明乌尔逊断陷具有较大的勘探潜力。随着乌尔逊断陷勘探开发的逐步深入,勘探开发区带由隆起带转向了凹陷区,油藏类型由构造油藏转向了岩性油藏。下白垩统铜钵庙组、南屯组和大磨拐河组等目的层发育扇三角洲前缘砂体,砂岩相带窄、相变快、非均质性强,砂泥岩以薄互层组合,储层厚度薄,纵、横向岩性变化大。砂岩储层横向连续性差,导致区块优选、井位部署及滚动钻井评价难度加大。针对乌尔逊断陷扇三角洲前缘砂泥岩薄互层组合,曾经开展过多轮次地震预测工作,但受地震资料及单一预测方法限制,研究区扇三角洲前缘砂体、湖底扇砂体的地震响应特征不明显,砂体边界不清,预测精度无法满足现阶段岩性油藏勘探评价的地质需求。因此,

为了解决岩性油藏薄窄砂体刻画难题,在借鉴前人研究成果的基础上,通过井震结合开展精细储层预测,形成了适合于复杂断陷岩性目标区的地震匹配追踪时频处理解释技术。

地震分频处理技术是地震属性分析中的一种频率域解释方法^[2]。国内外学者对分频处理、解释研究可追溯到20世纪80—90年代,当时只是应用分频处理资料沿地震反射层的一定窗内提取地震属性,进行定性的沉积环境、沉积相分析,但受傅里叶变换固定窗的影响,限制了在薄储层领域的应用。前人^[3-5]在分析地震资料时,引入了在时间域和频率域都可以表征信号局域化特征及变时窗特点的小波变换,其分频处理资料得到了明显改善,优势频率地震剖面的储层分辨能力得到了提高,也出现Gabor小波、离散Mallat小波等各种基于小波决定的算法。同傅氏变换相比,小波变换的分频效果更好,但数学运算上不但要求正交的小波函数,同时在一定程度上受地震处理时窗的影响。Stockwell等^[6]提出的S变换时频分析是介于短时傅里叶变换和连续小波变换之间的、应用小波变换的多尺度时频分析方法,S变换时频分析在克服傅里叶变换不

收稿日期:2019-05-07;改回日期:2020-11-12

本文受国家重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”所属专题“页岩气勘探地球物理技术研究”(编号:2011ZX05001-001-004)和中国石油天然气股份公司重大科技专项“大庆油田原油4000万吨持续稳产关键技术研究”子课题“乌尔逊凹陷扇体精细刻画与岩性油藏目标优选研究”(编号:2011E-1202)联合资助

第一作者:王江,博士,高级工程师,从事勘探部署、三维地震解释与方法研究工作。通信地址:163712 黑龙江省大庆油田有限责任公司勘探开发研究院海拉尔勘探评价研究室;E-mail:wangjia@petrochina.com.cn

能调节分析窗口频率的同时还可以进行相位校正。应用地震分频资料开展碎屑岩、碳酸盐岩储层预测,以及小断层识别解释和低频沉积旋回研究,取得了不同程度的研究效果^[6-9]。

本文应用地震匹配追踪时频处理技术,通过一系列小波构建初始模型,经过迭代优化逼近原始信号的瞬时谱,将时间域的地震信号分解成频率域的离散调谐体,应用频率域的离散数据开展扇三角洲前缘砂体预测,精细刻画扇体的三维轮廓和内部结构,应用研究成果指导岩性油藏井位部署及滚动评价,在乌尔逊断陷铜钵庙断裂带识别的9个有利岩性体中的7个实施勘探部署,其中在5个砂体中获工业油流,在2个砂体中获得低产油流,预测砂体顶界构造深度相对误差均小于0.3%,预测砂岩厚度的绝对误差均小于1 m。

1 地震匹配追踪时频处理技术

地震匹配追踪时频处理是一种基于投影追踪、逐步递推的小波算法,该算法是将地震信号分解为一系列反射时间不同、振幅各异的地震子波,对分解得到的子波进行时频分析,原始地震道频谱就是所有子波频谱叠加的结果。

2006年Liu^[10]基于Ricker子波匹配追踪算法通过复地震道分析技术得到三瞬地震属性(瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率),以最大瞬时振幅处的地震反射时间作为时间延迟的初始值,得到延时处的瞬时相位和瞬时频率。

主频为 f_j 的零相位Ricker子波在时间域的表达式为:

$$W_R(t, f_j) = [1 - 2\pi^2 f_j^2 t^2] \exp(-\pi^2 f_j^2 t^2) \quad (1)$$

式中: f_j 为地震主频,Hz; t 为地震反射时间,s; $W_R(t, f_j)$ 为时间域Ricker子波; j 为迭代次数。

在频率域的傅氏频谱为:

$$W_R(f, f_j) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_j^2} \exp\left(-\frac{f^2}{f_j^2}\right) \quad (2)$$

式中: f 为地震频率,Hz; $W_R(f, f_j)$ 为主频为 f_j 的频率域Ricker子波傅氏频谱; j 为迭代次数。

地震信号的稀疏表达式为:

$$s(t) = \sum_{j=1}^m a_j W(t-t_j, f_j, \varphi_j) + R_s^{(m)}(t) \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 为时间域带限地震信号; $R_s^{(m)}(t)$ 是匹配追踪后的残差; m 为通过设置的阈值来判断迭代终止条

件而确定的迭代原子个数。原子个数通过时间延迟 t_j (单位:s)、地震主频 f_j (单位:Hz)、相关系数 a_j 和相位 φ_j 等4个处理参数来控制。

$s(t)$ 匹配追踪时频谱 $u(t, f)$ 的解析式为:

$$u(t, f) = \sum_{j=1}^J a_j W_R(f, f_j) \text{env}[W_R(t-t_j, f_j)] \exp\{i[2\pi f(t-t_j) + \varphi_j]\} \quad (4)$$

式中:env是 W_R 的瞬时振幅。

2 技术应用及效果

乌尔逊断陷北部地震数据频带范围为8~60 Hz,主频(f)为28 Hz,砂岩平均层速度(v)为3 897~4 012 m/s,根据地震可分辨的极限厚度 $\Delta Z = v/(4 \times f)$ 计算,可识别的最薄砂体厚度为34~36 m。可见,目前地震资料无法识别研究区20~30 m厚的砂体,利用叠后地震波阻抗反演可识别的砂岩厚度仅为几十米,因此,对于薄层的单砂体,利用传统的地震波阻抗反演方法难以分辨。在频谱分解之前首先对地震资料进行脉冲反褶积提频处理,将地震的频宽拓展到8~80 Hz,提频后的地震带宽比常规地震数据带宽在高频端高出20 Hz,低频端保持不变,主频从原先的28 Hz拓展到37 Hz,这样拓频后的地震数据比常规地震数据丰富了很多细节。

2.1 分频处理的优势频率分析

传统的地震分辨率是指时间域内的地震储层分辨能力,分辨的极限厚度是 $\lambda/4$ (λ 为波长),而频谱分析突破了传统地震分辨率的限制,在频率域内对储层进行分辨,每个薄储层产生的地震反射在频率域都有一个特定的优势频率与其对应。图1为纵向砂岩厚度分别为3 m、5 m、10 m、20 m,横向频率 f 分别为30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz、70 Hz和80 Hz的时频正演理论模型,从图中可以看到高频调谐能量反映的是薄层的调谐响应,而低频调谐能量是厚层的调谐响应,各单一频率的子波对不同厚度储层的调谐响应是不同的,不同厚度的砂岩对应着不同的优势频率。因此经分频处理得到的单频三维地震资料,在有效地震频带内降低了子波叠覆和鸣振效应,突出了不同地质体对不同频率成分地震资料的敏感响应,而常规叠后地震资料是对整个地震频带范围的地震数据成像,无法满足对所有地质体都达到最佳的成像效果。因此,利用频率域的振幅谱可以识别沉积相带变化、沉积扇体三维轮廓以及薄储层的时间厚度。

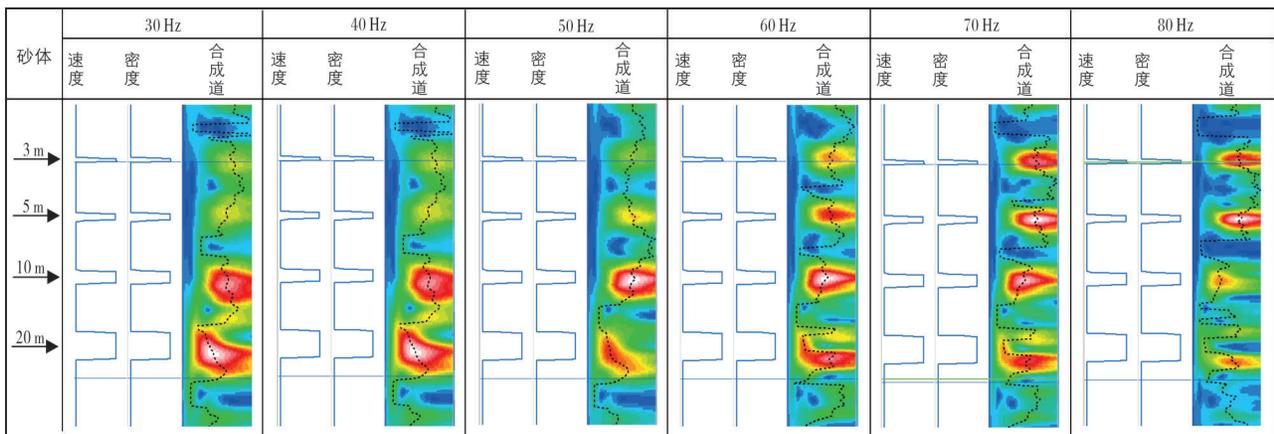


图1 不同厚度砂岩的时频正演理论模型

Fig.1 Theoretical model of time-frequency forward modeling of sandstone with different thickness

根据对乌尔逊断陷北部主要含油目的层储集特征与测井相的分析,目的层砂体厚度(ΔZ)一般为20~26 m(大磨拐河组20~25 m,南屯组23~30 m),砂岩平均层速度大磨拐河组为3 897 m/s、南屯组为4 012 m/s。据 $f=v/(4 \times \Delta Z)$ 计算砂岩储层的最小调谐频率,大磨拐河组为39~48 Hz,南屯组为38~43 Hz,即识别大磨拐河组、南屯组有利含油砂体

的地震优势频率理论上为38~48 Hz。图2为乌尔逊断陷北部S46井实际钻井的时频分析对比图,可见26 m砂组对应的优势频率为40 Hz左右,该频率下表现的调谐响应最强,而8~15 m砂组对应的优势频率为60~80 Hz。优势频率分析为单频剖面处理、利用优势频率识别砂体提供了理论基础和实践根据。

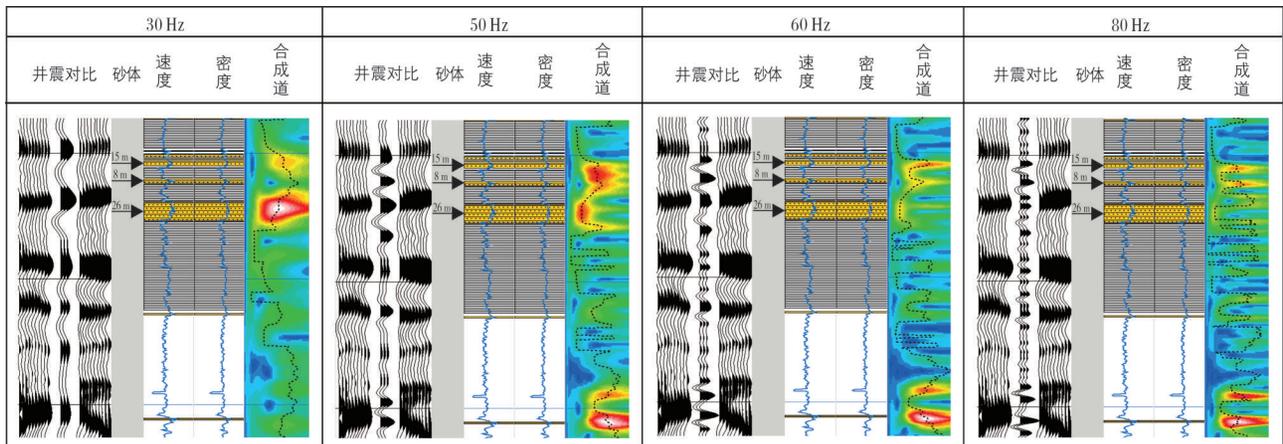


图2 铜钵庙断裂带S46井不同厚度砂岩的时频分析对比图

Fig.2 Time frequency analysis and comparison of sandstone with different thickness of Well S46 in Tongbomiao fault zone

2.2 优势频率的单频剖面特征

针对乌尔逊断陷复杂的地质条件,根据大磨拐河组和南屯组有利含油储层38~48 Hz的优势频率范围,对乌尔逊断陷北部铜钵庙断裂带三维地震资料应用匹配追踪时频处理技术开展分频处理。首先将地震道与小波库内所有小波互相关,再将地震道中去除相关性最大的子波投影所得到的残差与小波库互相关,再去掉最大相关性子波

的投影,如此递推迭代,直到剩余能量达到某一给定的阈值,迭代过程收敛,得到一系列离散频率的调谐数据体。然后通过地震四维时频频谱分析,利用代表某一特定主频的单频能量的单频体、峰值振幅和峰值频率等多种时频地震属性来预测有利储层。

从图3常规地震偏移剖面(图3a)与42 Hz单频偏移剖面(图3b)的对比图中可见,42 Hz单频偏移数据反映的S46井砂体边界清晰(见图3b虚线标注

部分),反射结构波组特征清楚,地层接触关系明确,而常规叠后地震资料是对整个地震频带范围的地

震数据成像叠加,无法满足所有不同尺度地质体都能达到最佳的成像效果。

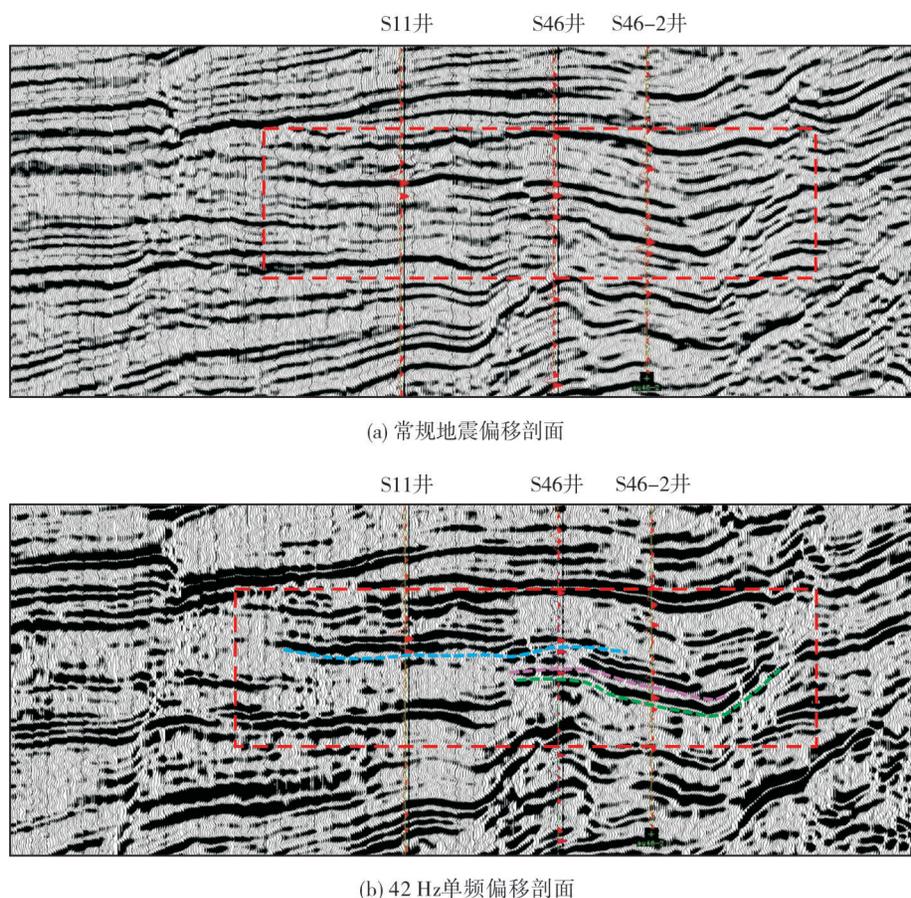


图3 铜钵庙断裂带三维常规偏移剖面与单频偏移剖面对比

Fig. 3 Comparison of 3D seismic conventional migration profile and single frequency migration profile in Tongbomiao fault zone

2.3 分频处理技术的地质效果

地震属性是对地震反射资料的描述和量化,是地震资料中所包含全部地质信息的子集,能揭示出地震数据体中的沉积、岩性和储层等信息^[11-15]。分频处理增强了薄储层频率响应,提高了地震资料的分辨率,可精细地反映地震属性异常变化,增强了薄储层的识别能力。

2.3.1 储层分布定性预测效果

在下白垩统铜钵庙组—南屯组沉积时期,乌尔逊断陷东部受北东向控陷断层——铜钵庙断层控制^[11],在半深湖—深湖背景下发育扇三角洲前缘砂体,与早期断层配合形成构造-岩性、岩性油气藏^[12]。但是,研究区地震资料分辨率较低,砂体的地震响应特征不明显,叠后、叠前时间偏移资料均无法确定砂体边界及岩性体间的关系。为了验证

单频地震资料的预测效果,分别应用常规地震资料和单频地震资料,考虑了储层厚度、位置及层速度,以等时地层格架为约束,在大磨拐河组一段、南屯组一段3砂组(简称南屯组1-3砂组)、南屯组2-1砂组出油层位的上、下30 ms选取时窗,由线到面提取敏感地震属性。图4a为乌北铜钵庙断裂带南屯组1-3砂组常规地震均方根振幅属性图,从图中可见,振幅类属性基本可以反映扇三角洲前缘和湖底扇储层的展布规律,但储层边界不清楚。通过与钻井对比发现,常规资料单一属性在预测储层分布上存在局限性。例如,钻井证实W1井、S11井、S22井和S37井南屯组1-3砂组岩性以泥岩夹泥质粉砂岩为主,砂岩不发育,应该具有弱振幅、中高频的反射特征,但在常规地震资料均方根振幅属性上,这4口井均落入了强振幅指示的砂岩发育区内。而且,钻井证实的S35井湖底扇砂体和S45井扇三角洲前缘砂

体间的均方根振幅属性边界不清,也影响了岩性圈闭的识别与刻画。图4b为铜钵庙断裂带南屯组1-3砂组42 Hz单频地震均方根振幅属性图,通过强振幅属性与钻遇砂岩一致性的对比分析发现:区域内28口探井和评价井中,有14口井在南屯组1-3砂组

钻遇砂岩储层,在图4b上显示均方根相对振幅值大于400;另外14口井南屯组1-3砂组的砂岩储层不发育,在图4b上显示均方根相对振幅值小于400。可见单频地震资料预测砂体的符合率为100%,明显优于常规地震资料的预测结果。

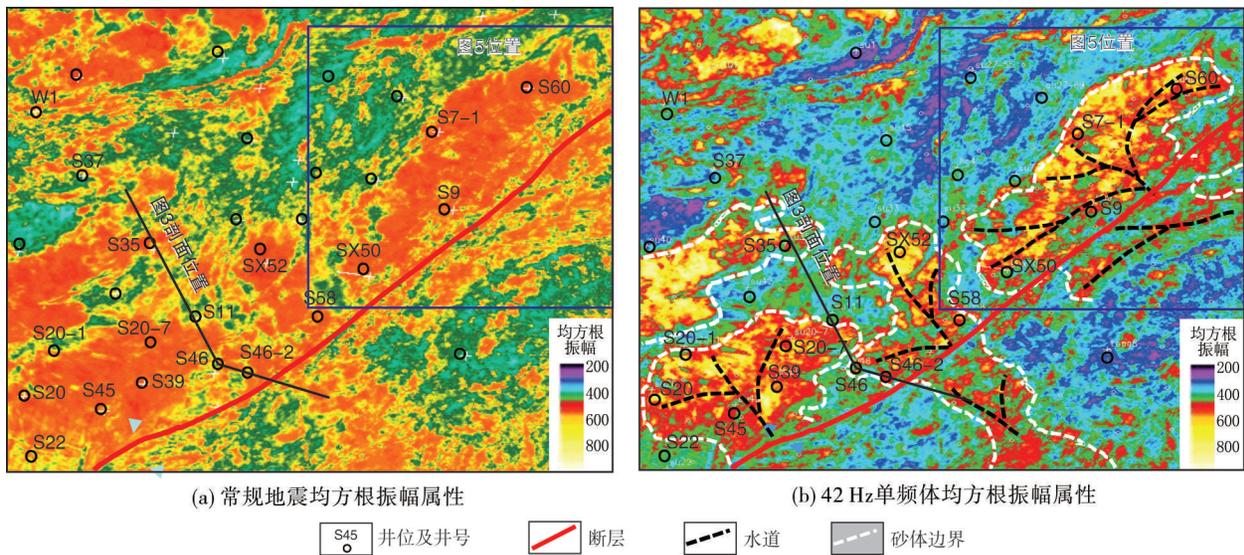


图4 铜钵庙断裂带南屯组1-3砂组均方根振幅地震属性图

Fig. 4 Root mean square amplitude attribute map of 1-3 sand group of Nantun Formation in Tongbomiao fault zone

通过对图4b单频数据体地震属性精细解释认为:在乌尔逊断陷铜钵庙断裂下降盘发育扇三角洲前缘砂体,中部发育湖底扇砂体,是岩性油藏的发育区。在单频数据振幅属性切片上,扇三角洲前缘砂体和湖底扇砂体均表现为明显的强振幅特征,由此推断乌尔逊断陷北部铜钵庙断裂带受东部物源控制,发育扇三角洲—湖底扇—一半深湖(深湖)沉积体系。

2.3.2 储层厚度定量预测效果

根据 Partyka 等^[16]的薄层分析理论,振幅谱伴随频率响应的陷频周期 P_i (单位:Hz)与薄层时间厚度 t (双程旅行时,单位:s)的关系为 $t=1/P_i$;而 $t=2\Delta Z/v$,其中 ΔZ 为薄层厚度(单位:m), v 为薄层速度(单位:m/s),这样薄层厚度 ΔZ 与 P_i 的关系为 $\Delta Z = v/(2 \times P_i)$;将首波峰值频率 f_0 (单位:Hz) $= P_i/2$ 代入时间厚度和薄层厚度等式后,以上两式则变为:

$$t=1/(2 \times f_0) \quad (5)$$

$$\Delta Z = v/(4 \times f_0) \quad (6)$$

式中首波峰值频率 f_0 可以通过地震资料分频分析得

到,这样通过公式(6)就可以计算薄层厚度。

图5a和图5b分别为S9井区南屯组1-3砂组砂体顶界构造图和根据分频处理资料得到的砂体厚度图,结合地震属性图分析,S9井区砂体是受东部物源控制在铜钵庙断裂下盘形成的扇三角洲前缘砂体,北西和南东方向受断层控制,沿铜钵庙断裂走向向北东和南西向尖灭,砂体最大厚度可达30 m。针对在南1-3砂组中预测的4个砂体部署的13口探井和评价井均钻遇所预测的储层,钻井实际与钻前预测相符,预测砂体顶界构造深度相对误差均小于0.35%(表1),预测砂岩厚度的绝对误差均小于1 m,相对误差均小于4%,预测精度满足精细储层预测和勘探开发的生产需求。

通过地震分频处理与解释,在铜钵庙断裂带大磨拐河组一段、南屯组1-3砂组、南屯组2-1砂组和铜钵庙组共识别有利岩性体9个,累计面积49.4 km²。目前已钻砂体7个,其中在5个砂体中获工业油流,在2个砂体中获得低产油流,其中S46井在大磨拐河组一段、南屯组和铜钵庙组分别获得4.81 t/d、11.68 t/d和9.6 t/d的高产工业油流。

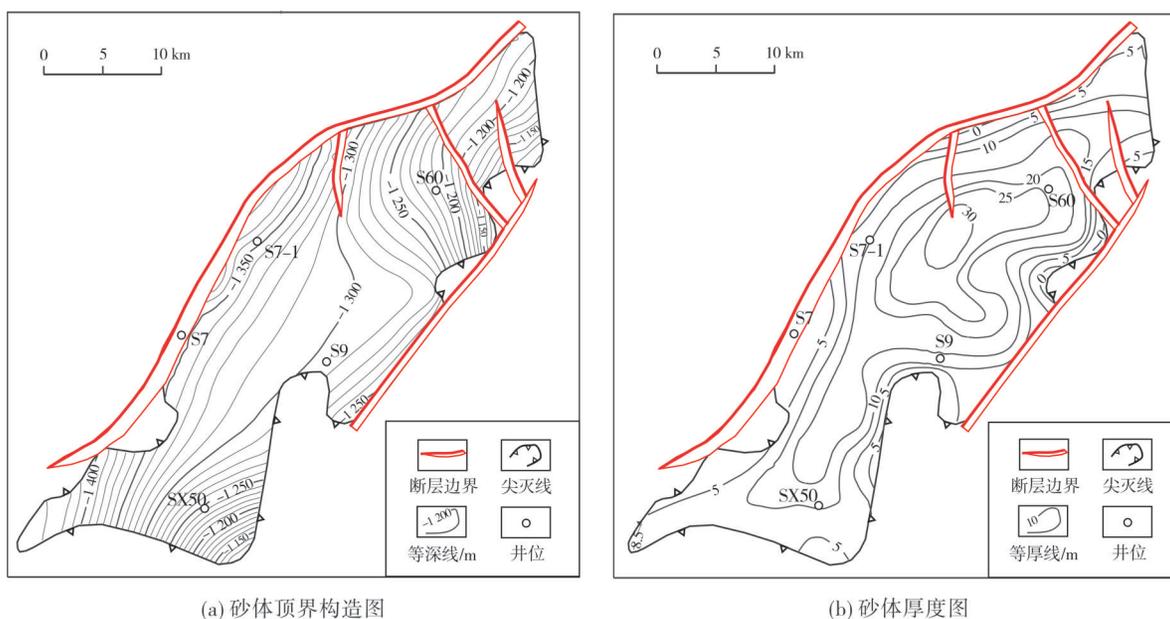


图5 铜钵庙断裂带S9井区南屯组1-3砂组砂体顶面构造图与砂岩厚度图

Fig. 5 Sand body top structural map and sandstone thickness map of 1-3 sand group of Nantun Formation in S9 well block of Tongbomiao fault zone

表1 铜钵庙断裂带南屯组1-3砂组含油砂体预测精度统计表

Table 1 Statistical table of prediction accuracy of oil-bearing sandbodies in sand group 1-3 of Nantun Formation in Tongbomiao fault zone

砂体名称	井名	含油砂体顶面深度				含油砂体厚度			
		预测深度/m	实钻深度/m	绝对误差/m	相对误差/%	预测厚度/m	实际厚度/m	绝对误差/m	相对误差/%
S45井区砂体	S45井	-1 372	-1 375	3	0.218	17.0	17.5	0.5	2.86
	S39井	-1 335	-1 338	3	0.224	20.0	20.8	0.8	3.85
	S20井	-1 430	-1 432	2	0.140	19.0	18.8	0.2	1.04
	S20-1井	-1 440	-1 437	3	0.209	13.0	13.3	0.3	2.26
	S20-7井	-1 441	-1 440	1	0.069	18.0	18.1	0.1	0.55
S46井区砂体	S46井	-1 222	-1 225	3	0.245	8.0	8.3	0.3	3.61
	S58井	-1 330	-1 331	1	0.075	22.0	21.6	0.4	1.85
	S52井	-1 320	-1 324	4	0.302	27.0	27.5	0.5	1.82
S9井区砂体	SX50井	-1 244	-1 246	2	0.161	10.9	11.1	0.2	1.80
	S9井	-1 292	-1 290	2	0.155	13.1	13.3	0.2	1.50
	S7-1井	-1 350	-1 353	3	0.222	13.8	13.5	0.3	2.22
	S60井	-1 217	-1 215	2	0.165	23.8	23.4	0.4	1.71
S35井区砂体	S35井	-1 590	-1 592	2	0.126	14.0	14.2	0.2	1.41

3 结论

(1) 每个有利砂体产生的地震-地质响应在频率域都有一个特定的优势频率与其对应,在这一优势频率的单频地震剖面上,特定厚度的砂体成像效果好,分辨率高。

(2) 通过地震匹配追踪时频处理,乌北三维单频地震数据适用于特定厚度的砂体预测,可以更清晰地

反映乌尔逊断陷扇三角洲前缘砂体的分布特征。

(3) 地震分频时频属性的地质意义明确,可以精细刻画、识别砂体,精细预测含油气储层,适用于各种隐蔽岩性油气藏。

参考文献

- [1] 张晓东,刘光鼎,王家林.海拉尔盆地的构造特征及其演化[J].石油实验地质,1994,16(2): 119-127.

- [2] 崔风林,管叶君.时频分析:薄互层结构研究的新途径[J].石油物探,1992,31(2): 1-15.
- [3] GABOR D.Theory of communication [J].Journal of institute electrical engineering,1946,93(3): 429-457.
- [4] MORLET J,ARENS G,FOURGEAU E,et al.Wave propagation and sampling theory: part I: complex signal and scattering in multilayered media[J].Geophysics,1982,47(2): 203-221.
- [5] 马朋善,王继强,刘来祥,等.Morlet小波分频处理在提高地震资料分辨率中的应用[J].石油物探,2007,46(3): 283-287.
- [6] STOCKWELL R G,MANSINHA L,LOWE R P.Localization of the complex spectrum: the S transform [J].IEEE transactions on signal processing,1996,44(4): 998-1001.
- [7] 吴淑玉,刘俊,肖国林,等.匹配追踪算法频谱分解的碎屑岩薄砂体储层预测:以北黄海盆地东部坳陷下白垩统为例[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(3): 197-207.
- [8] 徐秋枫,陈建文,姚泉,等.频谱分解技术在泥页岩储层含气性预测中的应用:以柴达木盆地鱼卡凹陷为例[J].地质通报,2016,35(2/3): 348-355.
- [9] 刘俊,吴淑玉,肖国林,等.频谱分解在北黄海东部坳陷下白垩统储层预测的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(4): 95-103.
- [10] LIU Jianlei. Spectral decomposition and its application in mapping stratigraphy and hydrocarbons[D].Houston: University of Houston,2006.
- [11] 王江,王雪峰,赵传军.地层岩相影像技术在储层预测中的应用[J].大庆石油地质与开发,2013,32(3): 123-125.
- [12] 高君,云美厚,王晓红.针对薄互层储集特点的地震属性优化技术及应用效果[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3): 91-93.
- [13] 薛大力,徐鸣洁,龚姚进,等.地震分频解释技术在沈143井区储层预测中的应用[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3): 128-131.
- [14] 尚尧.构造变形趋势法在乌尔逊凹陷地层剥蚀量恢复中的应用[J].大庆石油地质与开发,2013,32(3): 15-19.
- [15] 林东成,张宏,贾建亮,等.声波曲线分层重构反演在岩性预测中的应用[J].大庆石油地质与开发,2010,29(4): 167-170.
- [16] PARTYKA G,GRIDLEY J,LOPEZ J.Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization [J].The leading edge,1999,18(3): 173-184.

编辑:黄革萍

Application of seismic frequency division technique in sand body prediction of fan delta front: taking Nantun Formation of Tongbomiao fault zone in Wuerxun fault depression of Hailaer Basin as an example

WANG Jiang, CHEN Mo, WANG Jie, LIU Shuang, ZHOU Hao

Abstract: Wuerxun fault depression in Hailaer Basin is characterized by complex structure, developed faults and oil-bearing sand bodies in fan delta front. In order to solve the problems of small distribution range, thin thickness and difficult prediction of oil-bearing sand body, the discrete tuned seismic data body in frequency domain is obtained by seismic matching and tracking frequency division processing. The waveform characteristics of single frequency seismic section are clear, the energy is enhanced and the resolution is improved. Based on 3D dominant frequency division seismic data, the 3D contour and favorable reservoir distribution of fan delta front sandbodies of Nantun Formation in Tongbomiao fault zone are finely depicted. Through comprehensive analysis, it is considered that Tongbomiao fault zone is controlled by eastern provenance and develops fan delta-sublacustrine fan-semi deep lake (deep lake) sedimentary system. The prediction results of this technology conform to the geological law and are in good agreement with the drilling results.

Key words: seismic frequency division technique; seismic attribute; reservoir prediction; Tongbomiao fault zone; Wuerxun fault depression; Hailaer Basin

WANG Jiang, First author: PhD, Senior Engineer, engaged in exploration deployment, seismic interpretation and method research. Add: Research Institute of Exploration and Development of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China