

doi: 10.11720/wtyht.2019.1337

孔栓栓,韩自军,张德龙,等.分频振幅检测“亮点”型浅层气的方法研究及应用[J].物探与化探,2019,43(3):626-633.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1337>

Kong S S, Han Z J, Zhang D L, et al. The study and application of the method using frequency division amplitude to recognizing "bright spot" shallow gas layers[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 626-633. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1337>

分频振幅检测“亮点”型浅层气的方法研究及应用

孔栓栓,韩自军,张德龙,乔柱,温宏雷

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院,天津 300459)

摘 要: 渤中 A 油田浅层发育大量“亮点”型浅层气,此类气层的识别受调谐厚度的水层影响严重。针对该问题,笔者充分考虑气层、水层产生强振幅的主控因素的差异性,利用正演模拟,分析并总结了不同厚度的气层与调谐厚度的水层在不同分频体上的振幅能量响应规律,提出了利用分频振幅检测浅层“亮点”型气层的方法。将该方法应用于渤中 A 油田的浅层气预测中,取得了较好的效果,有效地指导了评价井位的部署,对渤海油田类似的气层预测研究具有一定参考价值。

关键词: “亮点”型浅层气;调谐厚度;分频振幅

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)03-0626-08

0 引言

渤中 A 油田位于渤海海域黄河口东洼边缘凹陷的复杂断裂带,其主要含油层系明化镇组下段属于典型的曲流河沉积,浅层发育大量的含气储层。该区地震资料带宽为 10~70 Hz,主频 40 Hz,纵向分辨率为 12~14 m。钻井数据表明该区气层厚度集中在 2~8 m,小于地震资料可分辨范围^[1]。该区发育的含气储层在地震剖面上表现为与周围同相轴能量相差较大的“亮点”型强振幅反射特征。同时,厚度在调谐厚度附近的含水储层具有相同的“亮点”型反射特征,故水层产生的假“亮点”对薄气层的识别产生了干扰^[2,3]。如何有效识别真假“亮点”,对该区评价过程中的井位部署至关重要。

利用频率信息实现烃类检测已被诸多学者证实。刘伟等提出了通过分析分频剖面之间瞬时振幅的差异来有效识别“亮点”型含气储层产生的强振幅与薄层调谐导致的强振幅^[2]。高静怀等分析了薄互层地震响应关系,提出了利用广义 S 变换提高

薄层的识别能力^[4]。Castagna 等利用瞬时时频分析研究了与烃类相关的低频阴影检测,指出了时频分析在烃类检测方面的优势^[5]。

文中在前人研究的基础上,根据渤中 A 油田已钻遇的浅层气层和水层的特征,通过正演模拟分析了调谐厚度的水层与不同厚度的气层在不同分频体上的振幅能量分布规律,根据该规律提出了利用分频振幅方法快速识别不同厚度的气层的方法。将该方法应用于渤中 A 油田,成功实现了该区浅层气的平面分布预测,有效指导了评价井位的部署^[6]。

1 方法原理

1.1 已钻井分析

渤中 A 油田 8 口探井所钻遇的 23 套储层在地震剖面上具有“亮点”型强振幅反射特征。依据含流体情况,将储层分为两类:一类是厚度在 2~8 m 之间的薄气层;一类是厚度在 8~15 m 之间的水层。为了分析气层与水层的地球物理差异,对储层的厚度、振幅、速度等参数进行统计交会分析^[7-9](图 1)。

收稿日期:2018-10-01;修回日期:2019-04-27

基金项目:十三五国家科技重大专项“渤海海域勘探新领域及关键技术研究”(2016ZX05024-003)

作者简介:孔栓栓(1988-),女,硕士,工程师,主要从事石油勘探地球物理工作。

图 1a 为储层顶面反射振幅与储层厚度的交会,由该图所示,气层和水层具有相同值域范围的反射振幅,即气层和水层在地震剖面上均表现为强振幅的反射特征。图 1b 和图 1c 分别为纵波速度、密度与深度的交会,由图所知,纵波速度随埋藏深度的增加而增加,水层速度与泥岩速度基本相当,气层速度略小。

根据图 1b,可以拟合出气层、水层、泥岩的纵波速度随深度的线性变化关系式。图 1c 所示,砂岩的密度与泥岩的密度具有明显的分界,砂岩密度为 $2\ 020\text{ kg/m}^3$,泥岩密度为 $2\ 200\text{ kg/m}^3$ 。由图 1 中交会图可得到气层、水层及泥岩的速度、密度随深度变化的关系,以此作为后续正演模拟的数据基础^[10-11]。

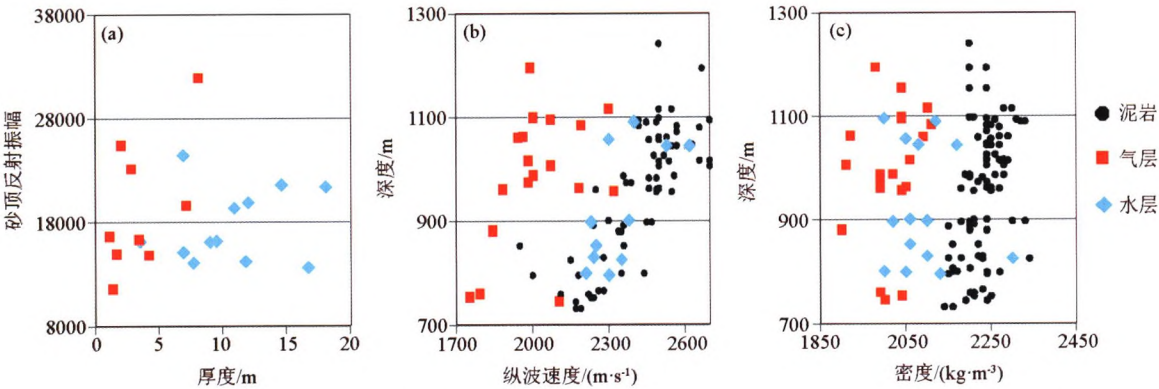


图 1 已钻井的地球物理参数交会
Fig.1 The cross-plots of geophysical parameters of wells

1.2 正演模拟

由于含流体性的不同,含气储层与含水储层的地震响应特征存在较大差异^[12-15]。文中在已钻井数据统计的基础上建立模型进行正演分析。图 2a 所示的双楔形地质模型中,蓝色楔状体为含水砂岩,红色楔状体为含气砂岩,灰色背景为泥岩。选用 40 Hz 的雷克子波通过褶积模型生成合成地震记录,如

图 2b 所示。统计各道的振幅值得到水层、气层振幅随厚度的变化关系,如图 3。由图 3 看出,当含水砂岩的厚度达到 13 m(即调谐厚度)时,其反射振幅值达到最大;且此时的反射振幅值与厚度在 4 m 左右的气层的反射振幅值相当。由此可见,调谐厚度的水层与研究区内较薄的气层在地震剖面上产生了相同的“亮点”反射。

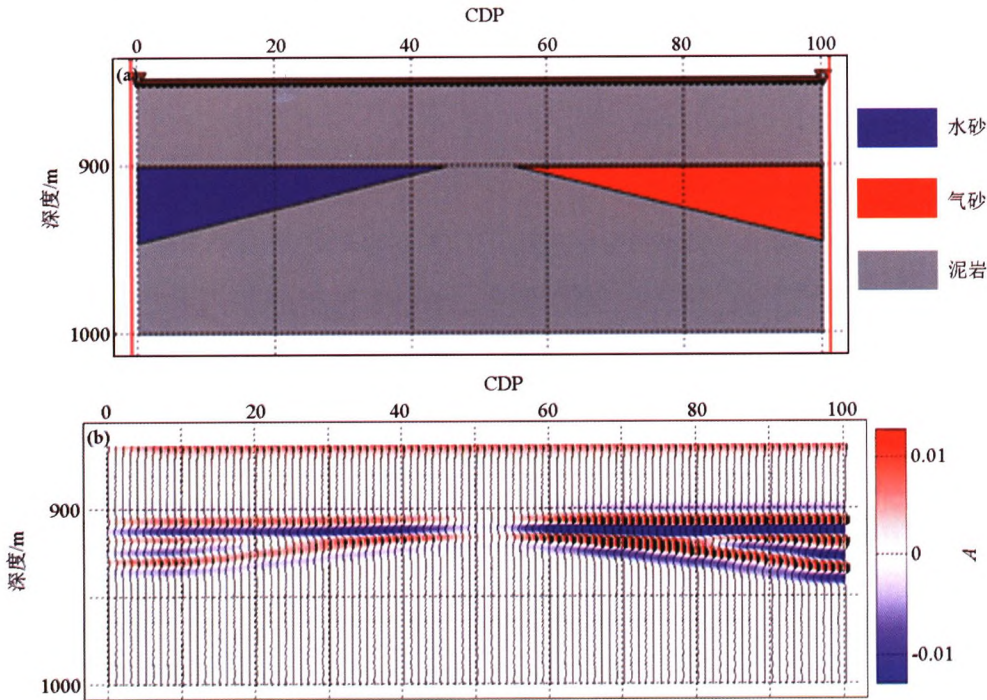


图 2 双楔形正演模型 (a) 及其正演合成记录 (b)
Fig.2 The double-wedge model (a) and its forward synthetic seismogram (b)

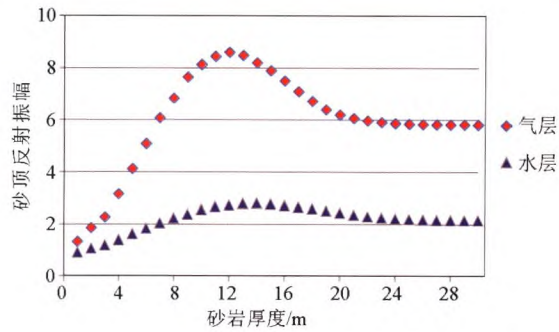


图 3 气层与水层的振幅随厚度的变化关系

Fig.3 The relationship between amplitudes and thickness of gas layers and water layers

虽然气层与调谐厚度的水层均可产生“亮点”反射,但二者的主控因素不同^[2]。储层含气后,纵波速度急剧下降,储层和上下围岩产生了较大波阻抗差,在岩性界面处产生了较大反射系数,从而导致反射振幅增强,地震剖面上出现“亮点”。而水层所产生的“亮点”是由调谐作用引起的,当储层厚度恰好达到与地震子波主频一致的调谐厚度时,受调谐作用影响产生了较强的反射振幅^[16-17]。综上,气层的“亮点”首先受到反射系数影响,其次才会根据厚度不同受到干涉、调谐、吸收衰减等因素的影响;而水层的“亮点”首先受到厚度调谐的影响,其次受干涉、反射系数、吸收衰减等因素影响。故气层与水层的“亮点”在产生机制上具有本质的不同。

基于以上观点,把图 2b 中的合成地震记录利用小波变换做分频处理,统计不同厚度的砂岩在不同分频体上的振幅^[18-21],如图 4a。由图可见,气层的反射能量整体上均高于水层,处于调谐厚度的水层在调谐频率附近会出现较强的反射振幅。据图 4a,根据气层的厚度不同,分三种情况讨论气层与水层的振幅差异:厚度小于调谐厚度的较薄的气层、厚度在调谐厚度附近的气层、厚度大于调谐厚度的较厚

的气层。选出具有代表性的厚度的三类气层与调谐厚度的水层对比得到图 4b,得到如下结论:

1) 当气层厚度在调谐厚度附近时(图 4b 中 10 m 厚气层),受调谐作用影响,振幅能量在低频段随频率的增加而增大,在频率达到某个中间频率(即调谐频率)时振幅能量出现极大值;随后受吸收衰减的影响,随频率的增加振幅减弱。但无论气层振幅强弱如何变化,在任意频段,该厚度范围的气层的反射振幅能量均强于水层。

2) 当厚度大于调谐厚度时(图 4b 中 20 m 厚气层),没有调谐作用的影响,振幅没有出现在调谐频率处明显增大的现象;但在低频段、中频段、高频段,气层的反射能量均强于水层。

3) 当厚度小于调谐厚度时(图 4b 中 5 m 厚气层),在中频段、高频段,气层的反射能量强于水层;但在低频段,受干涉作用影响,气层的能量与水层相当,均较弱。

为了更直观地说明分频振幅对识别不同厚度的气层的效果,本文设计了如图 5a 的矩形正演模型进行正演分析。模型中背景为泥岩,从左至右依次为厚度为 14 m(调谐厚度)的水层、5 m(小于调谐厚度)的气层、11 m(调谐厚度)的气层、18 m(大于调谐厚度)的气层。图 5b 为该正演模型的褶积合成地震记录。从合成记录上看,四类储层均表现为强振幅的“亮点”反射。对合成记录做基于小波变换的分频处理,得到 20 Hz、40 Hz、60 Hz 的分频剖面,如图 6。由图 6 所示,在 20 Hz 分频体上,调谐厚度的水层与薄气层的反射振幅能量均较弱,而调谐厚度的气层与较厚的气层的反射振幅能量较强;在 40 Hz 分频体上,四类储层均表现为强的反射振幅,其中调谐厚度的气层由于受反射系数增大和调谐作用的双重影响,反射能量明显强于其它三类储层;在

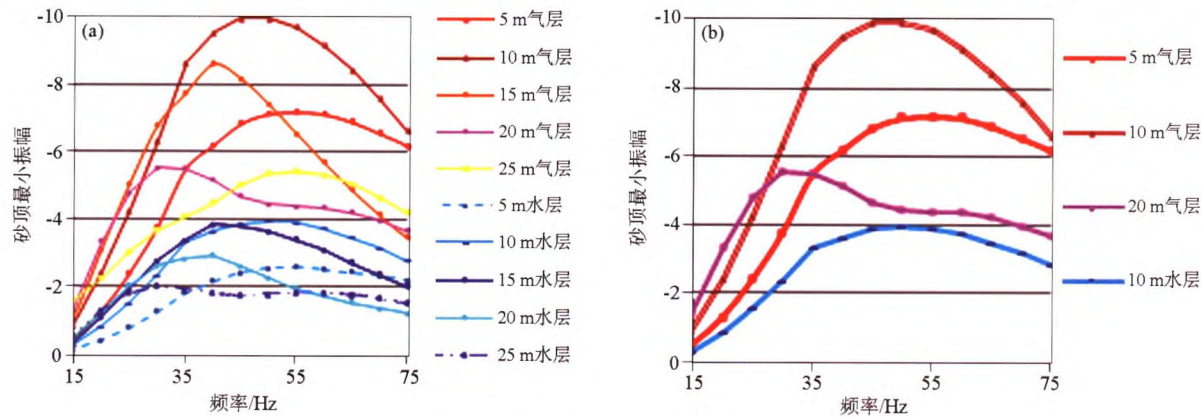


图 4 双楔形模型正演记录的振幅随频率变化

Fig.4 The relationship between amplitude and frequency of the synthetic seismogram of the double-wedge model

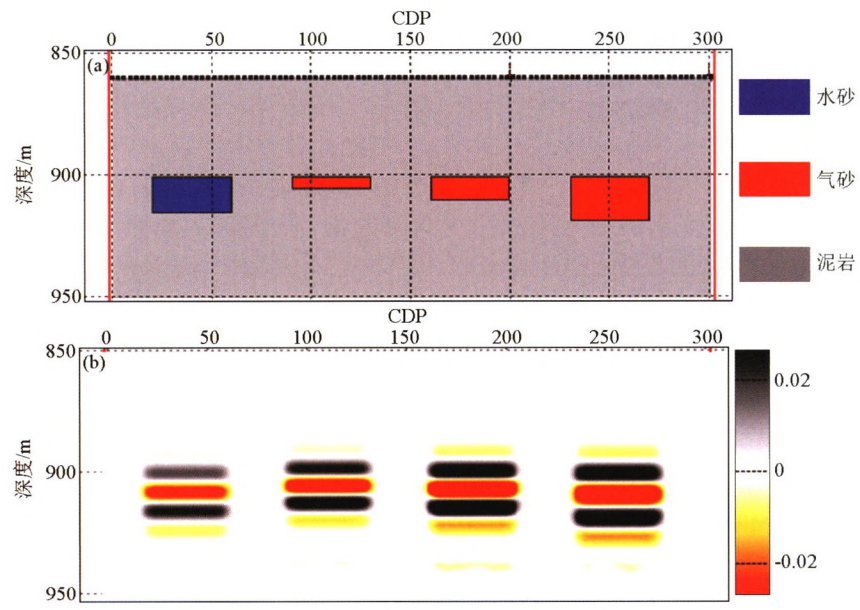


图 5 矩形正演模型 (a) 及其正演合成记录 (b)

Fig.5 The rectangle model (a) and its forward synthetic seismogram (b)

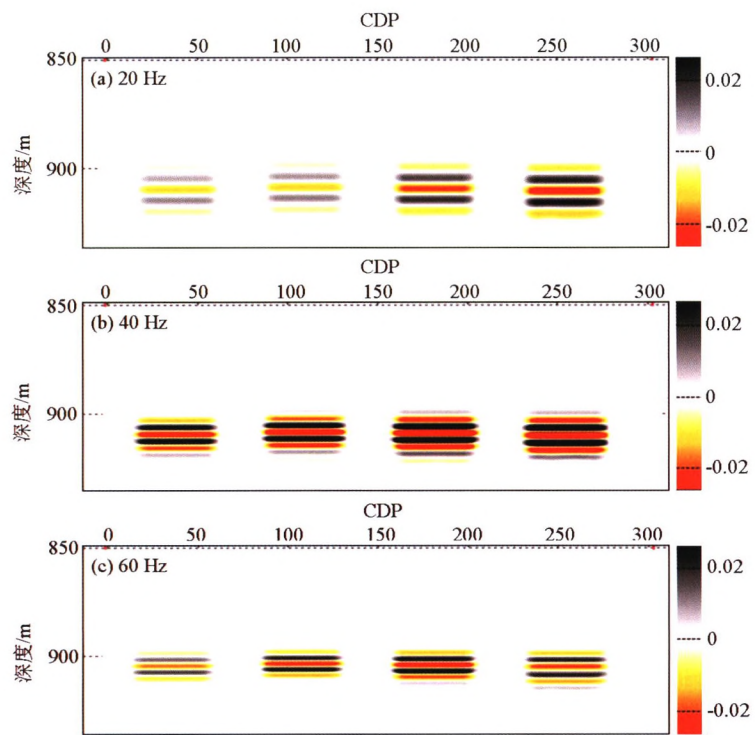


图 6 图 5b 所示合成记录的分频体剖面

Fig.6 The frequency-division profiles of the synthetic seismogram in fig. 5b

60 Hz 高频体上,四类储层表现出不同的情况:调谐厚度的水层的反射振幅很弱,三类气层的能量较强,较厚的气层由于受吸收衰减的影响能量稍弱于其它两类气层,但仍然强于水层。

1.3 分频振幅检测方法

以上正演分析表明,可产生“亮点”反射的四类储层的反射振幅能量在不同分频体上的强弱不同,

如表 1。调谐厚度的水层的反射振幅随着频率由低到高的变化呈现出弱—强—弱的变化规律;薄气层的反射振幅随着频率由低到高的变化呈现出弱—强—强的变化规律;调谐厚度的气层的反射振幅随着频率由低到高的变化呈现出强—极强—强的变化规律;厚气层的反射振幅随着频率由低到高的变化呈现出强—强—强的变化规律。

表 1 气层和水层的反射振幅随频率的强弱变化规律
Table 1 The reflection amplitudes of gas layers and water layers varies with the intensity of frequency

流体相	水层	气层		
储层厚度	=	<	=	>
低频体	-	-	+	+
中频体	+	+	++	+
高频体	-	+	+	+

备注：“=”、“<”、“>”分别表示储层厚度等于、小于、大于调谐厚度，“-”、“+”、“++”分别表示振幅能量为弱、强、极强

Notes: “=”、“<”、“>” represent the thickness of sand equal to、less than and great than the tuning thickness respectively; “-”、“+”、“++” represent weak amplitude、strong amplitude and very strong amplitude respectively

根据以上结论,针对渤中 A 油田的已钻遇气层厚度,本文制定了图 7 的技术路线:

在保幅处理的地震资料基础上,进行基于小波变换的分频体提取,再对分频体分别提取沿层极值振幅属性。根据平面属性,首先在中频段上搜索“亮点”的分布范围,该频段的“亮点”包含了气层、水层;然后根据高频段振幅能量识别真假亮点,强振幅为气、弱振幅为水;同时可根据低频段振幅的强度定性表征气层的厚度;最后再利用低频段信息对识别的“亮点”进行验证。

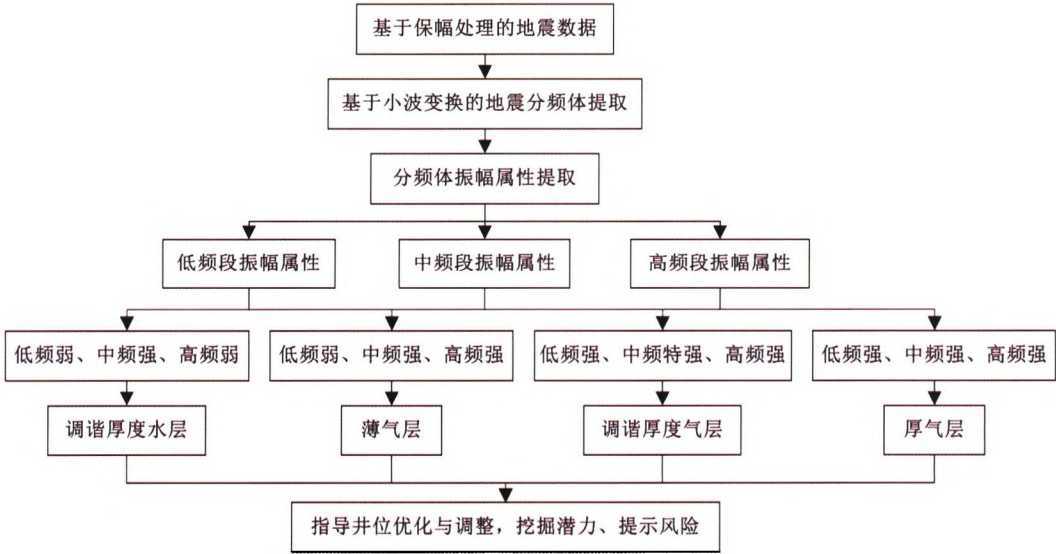


图 7 基于分频振幅检测的“亮点”型浅层气识别流程

Fig.7 The flow diagram of the recognition of "bright spot" gas layers based on frequency-dividing amplitude

2 应用分析

2.1 过井剖面验证

井的实钻结果验证了利用分频振幅检测“亮

点”型浅层气的有效性。图 8、图 9 分别为过 A1 井、A2 井的地震分频剖面及岩性柱状图,从左至右依次为 15 Hz、35 Hz、55 Hz 频率体。图 8 和图 9 中,黑色椭圆形标注的分别是厚度为 13.1 m、9 m 的含水砂岩,这两套砂岩在低频剖面上振幅能量较弱,在中频

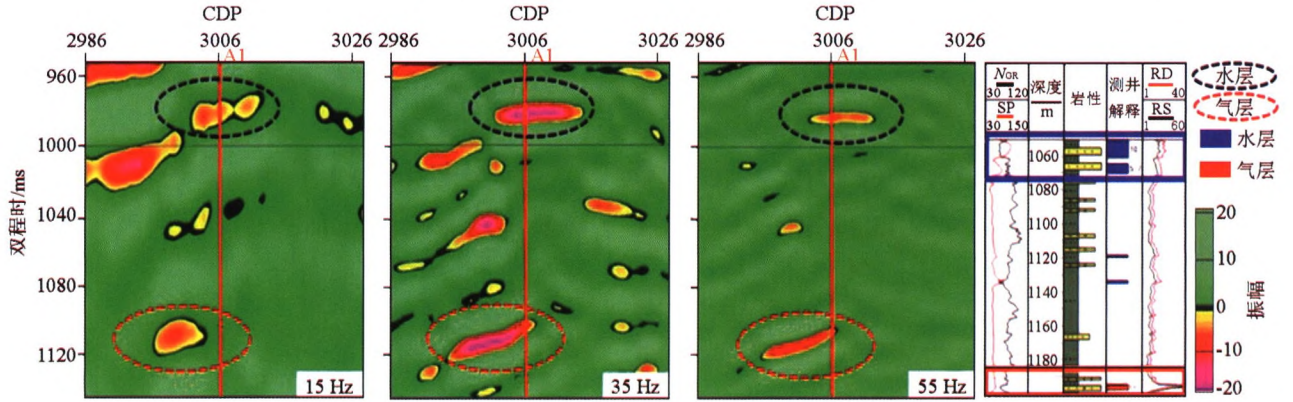


图 8 过 A1 井的地震分频剖面及岩性柱状

Fig.8 The frequency-division profiles crossed Well A1, and the lithological diagram of Well A1

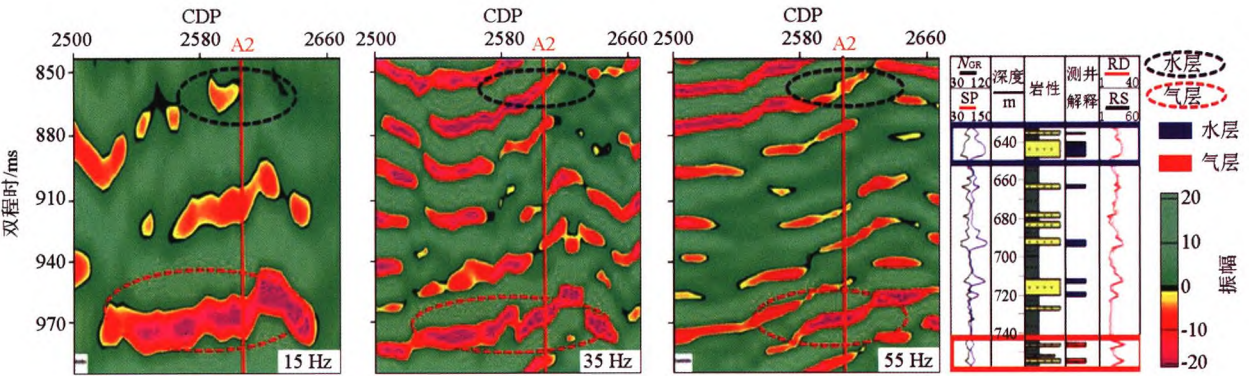


图 9 过 A2 井的地震分频剖面及岩性柱状

Fig.9 The frequency-division profiles crossed Well A1, and the lithological diagram of Well A2

剖面上能量较强,高频剖面上又变弱;图 8 中红色椭圆标注的是厚度为 3.4 m 的薄气砂岩,该砂岩在低频剖面上振幅能量较弱,在中、高频剖面上能量较强。图 9 中红色椭圆标注的是总厚度为 10.5 m 的互层气砂,该砂体在低、中、高频剖面上都表现为强振幅。A1 和 A2 两口井的实钻结果证实了利用分频振幅检测亮点气的可行性及可靠性。

2.2 气层平面分布预测

根据表 1 的结论,本文利用分频振幅实现了渤中 A 油田区的“亮点”型浅层气平面分布范围预测,将预测结果应用于渤中 A 油田的评价过程,经钻井证实了预测结果的准确性,并指导了井位部署。首先对地震资料进行基于小波变换的分频处理,得到低、中、高频段的数据;然后对目的层段内的不同频段数据体提取沿层振幅极值属性,利用各个频段平面属性综合预测气层分布范围。图 10 为目的层段内不同分频体的最大振幅属性平面。根据分频振幅

检测方法,图中红色椭圆标注的范围在中频、高频段都为强振幅,指示气层分布范围;黑色椭圆标注的范围仅在中频段为强振幅、低频高频段为弱振幅,指示水层分布范围。

图 11 为图 10 中白色连井线的过井剖面,剖面上从左至右的椭圆依次对应图 10 中从北向南的椭圆。A3 井钻遇的“亮点”反射,在低频体上表现为弱振幅,在中频、高频体上表现为强振幅,钻前预测该“亮点”为薄气层反射,与实钻 4 m 气层的结果相吻合。A4 井钻遇的“亮点”反射,仅中频体上的振幅能量较强,低频、高频体上的振幅能量均较弱,与水层的分频振幅能量分布特征相同。最终该井在“亮点”反射处钻遇 9.1 m 水层,与预测结果吻合。同时,据平面振幅属性显示,A5 设计井、A6 设计井所钻遇的“亮点”在各频率段的振幅能量均较强,预测强振幅反射将钻遇较厚的气层。

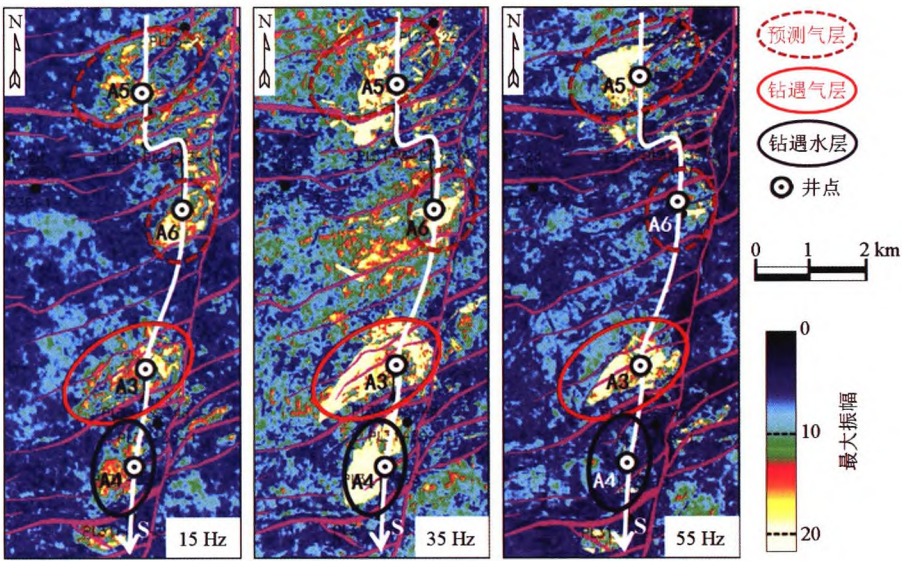


图 10 渤中 A 油田某目的层的分频振幅平面属性

Fig.10 The max-amplitude attribute slices of frequency-division data in BoZhong A Oilfield.

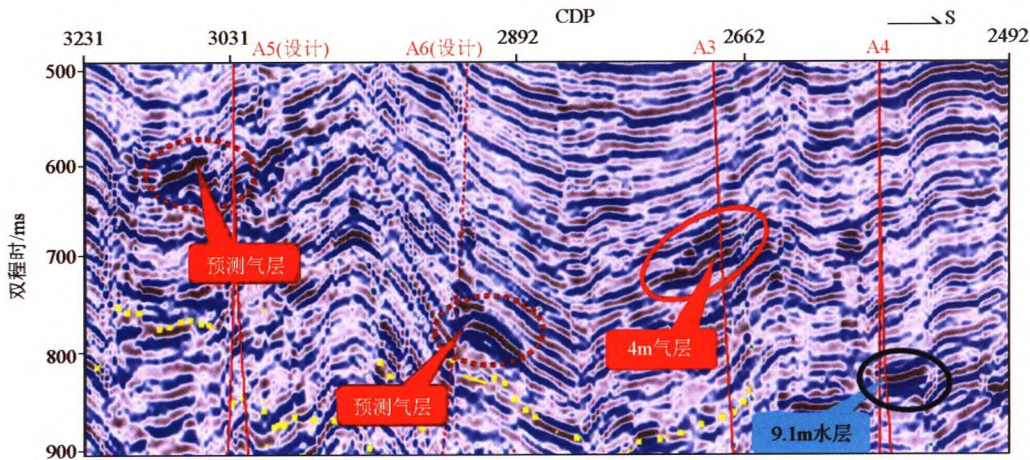


图 11 过图 10 中白色连井线的地震剖面

Fig.11 The seismic section crossed drilled wells along the white line shown in Fig.10

3 结论

1) 气层和水层均可在地震剖面上产生强振幅的“亮点”反射,但二者的主控因素不同。气层强振幅的主控因素为反射系数,水层强振幅的主控因素为调谐作用。

2) 不同厚度的气层与调谐厚度的水层在地震数据的分频体上表现为不同的振幅响应规律,该规律可以作为识别“亮点”型浅层气的依据。

3) 分频振幅检测“亮点型”浅层气的方法在渤海 A 油田的成功应用,表明该方法具有简便、快捷、有效的优势。该方法可以进一步推广应用到渤海其他同类型的储层预测工作中,为油气藏勘探过程中探井井位部署提供可靠的技术支持。

参考文献 (References):

- [1] 张军华,王庆峰,张晓辉,等.薄层和薄互层叠后地震解释关键技术综述[J].石油物探,2017,56(4):459-471.
Zhang J H, Wang Q F, Zhang X H, et al. Poststack interpretation key techniques for thin layer and thin interbed reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(4): 459-471.
- [2] 刘伟,曹思远.“亮点”型含气储层与薄层调谐的识别[J].石油地球物勘探,2015,50(4):678-683,705.
Liu W, Cao S Y. Identification of gas reservoir related with bright spots and thin-bed tuning[J]. OGP, 2015, 50(4): 678-683, 705.
- [3] 杨贵祥.基于调谐频率与分频处理的高分辨率反演技术[J].石油物探,2006,45(3):242-244.
Yang G X. High resolution inversion based on tuning frequency and frequency decomposition[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 242-244.
- [4] 高静怀,陈文超,李幼铭,等.广义 S 变换与薄互层地震响应分析[J].地球物理学报,2003,46(4):526-532.
Gao J H, Chen W C, Li Y M, et al. Generalized S transform and seismic response analysis of thin inter beds[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(4): 526-532.
- [5] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbon[J]. The Leading Edge, 2003, 22(2): 120-127.
- [6] Kong S S, H. Zijun, Z. Delong. A High Resolution Reservoir Prediction Based On Pre-Stack Inversion with DE: A Case Study in KX Oilfield[C]//80th EAGE Conference & Exhibition, 2018: 599.
- [7] 印兴耀,张世鑫,张繁昌,等.利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层描述和流体识别[J].石油地球物勘探,2010, (3): 373-380.
Yin X Y, Zhang S X, Zhang F C, et al. Utilizing Russell Approximation-based elastic wave impedance inversion to conduct reservoir description and fluid identification[J]. OGP, 2010, 45(3): 373-380.
- [8] 李英,秦德海.基于流体替代的敏感弹性参数优选及流体识别在渤海 B 油田的应用[J].物探与化探,2018,42(4):662-667.
Li Y, Qin D H. The optimization of sensitive elastic parameters based on fluid substitution and the application of fluid identification to Bohai B Oilfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 662-667.
- [9] 张世鑫,印兴耀,梁锴,等.利用基于 T-K 算子的非线性能量衰减分析技术进行储层含油气检测[J].地球物理学进展,2011, 26(6): 2107-2113.
Zhang S X, Yin X Y, Liang K, et al. Utilizing T-K operator-based nonlinear energy attenuation analysis to conduct reservoir hydrocarbon identification[J]. Progress in Geophys, 2011, 26(6): 2107-2113.
- [10] 印兴耀,曹丹平,王保丽,等.基于叠前地震反演的流体识别方法研究进展[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):22-34,46.
Yin X Y, Cao D P, Wang B L, et al. Research progress of fluid discrimination with pre-stack seismic inversion[J]. OGP, 2014, 49(1): 22-34, 46.
- [11] 郝前勇,张世鑫,张峰,等.基于频变 AVO 反演的频散属性估算方法及其应用[J].石油地球物勘探,2013,48(2):255-261.
Hao Q Y, Zhang S X, Zhang F, et al. Dispersion attributes estimation based on frequency-dependent AVO inversion and its application in hydrocarbon detection[J]. OGP, 2013, 48(2): 255-261.

- [12] 陈学华, 贺振华, 黄德济, 等. 时频域油气储层低频阴影检测[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 215–221.
Chen X H, He Z H, Huang D J, et al. Low frequency shadow detection of gas reservoirs in time-frequency domain[J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2009, 52(1): 215–221.
- [13] 张平平, 秦德海. 含烃亮点属性在渤海黄河口凹陷明化镇组油气识别中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 684–688.
Zhang P P, Qin D H. Application of bright spot containing hydrocarbon in oil and gas identification of Ming Huazhen Formation in Bohai Huang Hekou depression[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 684–688.
- [14] 李庆忠. 含油气砂层的频率特征及振幅特征[J]. 石油地球物理勘探, 1987, 22(1): 1–23.
Li Q Z. The frequency and amplitude of seismic waves sandstone[J]. OGP, 1987, 22(1): 1–23.
- [15] 左国平, 吕福亮, 范国章. 赤道几内亚湾深水海域基于部分叠加角道集的地震烃类检测[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 841–852.
Zuo G P, Lv F L, Fan G Z. Seismic hydrocarbon detection based on partial stack angle gathers in offshore deep-water of the Equatorial Guinea Bay[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 841–852.
- [16] 李雪英, 陈树民, 王建民, 等. 薄层时频特征的正演模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3410–3419.
Li X Y, Chen S M, Wang J M, et al. Forward modeling studies on the time-frequency characteristics of thin layers[J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2012, 55(10): 3410–3419.
- [17] 赵伟, 陈小宏, 李景叶. 薄互层调谐效应对 AVO 的影响[J]. 石油物探, 2006, 45(6): 570–573.
Zhao W, Chen X H, Li J Y. Analysis of impact of thin interbed tuning effect on AVO[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(6): 570–573.
- [18] 李雪英, 文慧俭, 陈树民, 等. 等厚薄互层时频特征的正演模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1033–1042.
Li X Y, Wen H J, Chen S M, et al. Forward modeling studies on the time-frequency characteristics of isopachous thin interbedding[J]. Chinese Journal Of Geophysics, 2013, 56(3): 1033–1042.
- [19] 李伟, 岳大力, 胡光义, 等. 分频段地震属性优选及砂体预测方法——秦皇岛 32-6 油田北区实例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 21–130.
Li W, Yue D L, Hu G Y, et al. Frequency-segmented seismic attribute optimization and sandbody distribution prediction: an example in North Block, Qinghuangdao 32-6 Oilfield[J]. OGP, 2017, 52(1): 121–130.
- [20] 高静怀, 刘乃豪, 吕奇, 等. 薄互层型油气储层同步挤压变换域分析方法[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 512–521.
Gao J H, Liu N H, Lv Q, et al. Characterization of thin interbedded reservoir using synchrosqueezing transform[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 512–521.
- [21] 王静波, 陈祖庆, 蒋福友, 等. 频率域高分辨率地震波阻抗直接反演方法研究[J]. 石油物探, 2017, 56(3): 416–423.
Wang J B, Chen Z Q, Jiang F Y, et al. A direct-inversion method of high-resolution seismic impedance in frequency domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(3): 416–423.

The study and application of the method using frequency division amplitude to recognizing "bright spot" shallow gas layers

KONG Shuan-Shuan, HAN Zi-Jun, ZHANG De-Long, QIAO Zhu, WEN Hong-Lei

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch Company of CNOOC, Tianjin 300459, China)

Abstract: The shallow layer of Bozhong A oilfield develops a large number of "bright spot" gas-bearing reservoirs. The identification of these reservoirs is seriously affected by the water-bearing reservoirs with the tuning thickness. To solve this problem, the authors, based on the difference of the main control factors of the strong amplitude caused by the gas and water layers, analyzed and summarized the amplitude energy response law of the different thickness of the gas layer and the water layer with tuned thickness, and proposed the method for detecting the shallow "bright spot" type gas layer by using the frequency-dividing amplitude. The method was successfully applied to the prediction of gas-bearing reservoirs in Bozhong A oilfield, and guided the well-appraisal proposal efficiently. This method can be potentially applied to the other gas-bearing reservoirs prediction in Bohai and provide reliable technical supports for well deployment of oil and gas exploration.

Key words: "bright spot" gas layers; tuning thickness; frequency-dividing amplitude

(本文编辑: 叶佩)