doi: 10.11720/wtyht.2023.1272

刘庆文,李键,秦德文. AVO 梯度谱蓝化在中深层薄砂岩刻画中的应用[J]. 物探与化探,2023,47(2):438-446. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.1272

Liu Q W, Li J, Qin D W. Application of the AVO gradient-based spectral bluing technique in the characterization of thin sandstones in moderately deep strata[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2);438-446. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023. 1272

AVO 梯度谱蓝化在中深层薄砂岩刻画中的应用

刘庆文,李键,秦德文

(中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200300)

摘要:传统谱蓝化主要用于叠后地震拓频处理,适用于测井波阻抗能较好辨别砂、泥岩的浅层,对于中深层阻抗混叠区局限性较大。AVO梯度反映相对反射系数随炮检距的变化,与泊松比变化率呈现正相关,而泊松比能较好辨别中深层砂、泥岩。本文首先通过岩性组合、物性及流体等参数变化,正演论证了AVO梯度在中深层辨识砂岩顶界面的可靠性与稳定性;进一步地,针对中深层薄砂岩刻画精度低问题,提出一种基于AVO梯度信息的谱蓝化地震拓频技术,通过对AVO梯度谱蓝化拓频,提高薄储层刻画精度。模型试算及实际应用表明:基于AVO梯度的谱蓝化可以直接运用AVO梯度辨识储层界面信息,简化基于CRP道集或角度部分叠加的多参数岩性预测方法;同时,该方法较好解决了XH凹陷深埋地层薄砂岩刻画难题,对中深层地震高分辨率处理有一定借鉴意义。

关键词:中深层;AVO 梯度;谱蓝化;地震高分辨处理;薄储层刻画

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)02-0438-09

0 引言

随着海上油气勘探开发的不断深入,增储上产 逐步聚焦中深层结构复杂、储层偏薄的薄互层油气 藏,但受限于深层地震资料频带宽度有限、分辨率低 等问题,薄储层刻画难度大^[1-2]。针对这一问题,地 震高分辨率处理成为一种关键技术手段,常用高频 恢复技术包括谱白化、反褶积及反Q滤波等^[3-6],这 些技术在实际地震资料高分辨率处理均取得较好应 用,但也存在一些假设条件或局限^[7]。谱白化的 "白谱"假设不符合实际地震频谱特征,易引起纵向 补偿不均衡问题;反褶积方法假设地层反射系数具 有统计白谱及子波最小相位信号,且时变子波求取 难度大;反Q滤波中Q值估算精度难以有效保证。

谱蓝化利用实际地震频率与振幅正相关"蓝 谱"特征,将地震和测井反射系数谱进行匹配求取 蓝化算子,将该算子与地震褶积得到拓频数据,通过 这种井控思路来提高地震分辨率。Blache-Fraser G^[8]首次提出谱蓝化与有色反演开展叠后地震高分 辨率处理思想。近几年,国内外学者也开展了诸多 相关研究,Neep^[9]提出时变谱蓝化思想,通过分时 窗求取蓝化算子,解决大时窗谱均衡问题;国内学者 杨瑞召等^[10]、陈文雄^[11]利用谱蓝化技术较好地解 决了薄煤层识别、薄储层刻画难题,杨培杰^[12]提出 了复数域约束最小二乘谱蓝化,通过设计一个宽频 约束目标谱,更好地提高地震主频,这些方法均取得 较好应用效果,但方法应用主要聚焦叠后资料高分 辨率处理。Kazemeini等^[13]在叠后谱蓝化基础上, 提出将谱蓝化算子应用到叠前道集处理中,并论证 了叠前谱蓝化相较于叠后方法的优势;李贤兵等^[14] 利用叠前谱蓝化在薄隔层识别及砂体边界取得较好 成效,但叠前谱蓝化技术应用依然局限于叠后资料 优化对比,这对于中深层阻抗混叠区局限性较大。

1985年 Shuey^[15]简化了 Zoeppritz 方程,首次提 出反射系数中 AVO 截距和梯度概念,随后,Rutherford 等^[16]、Castagna 等^[17]进一步深化了 AVO 属性 油气检测研究。近几年,国内学者利用截距、梯度属

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2023-02-13

基金项目:中国海油"七年行动计划"东海专项课题(CNOOCKJ135ZDXM39SH01);中国海油"十四五"重大科技项目"海上深层/超深层油气勘 探技术"(KJGG2022-0402)

第一作者:刘庆文(1988-),男,硕士,主要从事海油石油勘探地球物理研究工作。Email:liuqw3@ cnooc.com.cn

性也开展了相关甜点、油气检测等研究,王迪等^[18] 通过变参数正演模拟建立了致密气甜点储层的 AVO 定量解释量板;付琛等^[19]针对常规 AVO 属性 识别气层难,提出一种相对 AVO 属性,较好地放大 了气、水层的 AVO 差异,这些应用主要集中在油气 识别上;在岩性识别上,刘力辉等^[20]利用 AVO 梯度 与泊松比变化率的正相关性,采用 AVO 梯度 90°相 移进行储层刻画,并在四川盆地取得较好应用效果, 但缺乏对 AVO 梯度界面判别的系统性论证。

针对 XH 凹陷中深层薄储层刻画难及叠后谱蓝 化局限性较大等问题,本文首先通过变参数正演模 拟论证了 AVO 梯度对中深层砂岩顶界面辨别的精 度及稳定性,在此基础上,针对薄互层刻画难问题, 利用 AVO 梯度与泊松比变化率的正相关性,提出一 种基于 AVO 梯度信息的谱蓝化拓频技术,该方法直 接对反映叠前信息的 AVO 梯度作类似叠后地震谱 蓝化拓频,规避了 CRP 道集高分辨率处理的复杂 性,同时,提高了薄储层识别精度。

1 AVO 梯度界面识别

1.1 AVO 梯度原理

Shuey 对 Zoeppritz 方程进行近似,提出 AVO 截 距和梯度,其反射系数公式为:

$$R(\theta) \approx R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta \sigma}{(1-\sigma)^2}\right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta)$$
(1)

其中:

$$R_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_{\rm p}}{V_{\rm p}} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad , \tag{2}$$

$$A_0 = B - 2(1+B) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma} , \qquad (3)$$

$$B = \frac{\Delta V_{\rm p}/V_{\rm p}}{\Delta V_{\rm p}/V_{\rm p} + \Delta \rho/\rho} \quad , \tag{4}$$

式中, V_{p} 、 ρ 、 σ 、 ΔV_{p} 、 $\Delta \rho$ 、 $\Delta \sigma$ 分别为纵波速度、 密度、泊松比、界面两侧介质纵波速度差、密度差及 泊松比差,其中泊松比与 V_{p}/V_{s} 表现为正相关,公式 为:

$$\frac{V_{\rm p}^2}{V_{\rm s}^2} = \frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma} , \qquad (5)$$

进一步地,将式(1)简写成:

$$R(\theta) \approx P + G \sin^2 \theta + C (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta)$$
 (6)

当 $\theta < 30^{\circ}$ 时, $C(\tan^2\theta - \sin^2\theta)$ 高阶项可忽略, 式中, $P \setminus G$ 分别表示 AVO 属性中的截距、梯度,可 以看出,截距 P 与界面两侧介质的阻抗差异相关, 梯度 G 与由泊松比变化率 $\Delta \sigma$ 表现为正相关性, $\Delta \sigma$ 差异越大, G 值就越大, 而泊松比能较好区分中深 层砂、泥岩, 砂岩泊松比偏低值, 泥岩偏高值, 且不受 阻抗差异影响, 即 G 值变化一定程度上可以反映岩 性界面变化。

为了更直观地反映梯度 *G* 物理意义,对叠前 CRP 道集每一道作反射系数 $R(\theta)$ 和入射角 θ 拟 合,得到 4 种类型砂岩 (θ , $R(\theta)$) 的 AVO 特征曲线 (图 1 所示),具体弹性参数见表 1。分析可知, I 类 (深层高阻抗砂岩)、II 类 a、b 型(中深层阻抗混叠 区砂岩)及 III 类(浅层低阻抗砂岩)砂岩顶界面的 AVO 斜率(梯度 *G*)均表现为负值,且不受纵坐标截 距 *P* 影响。基于此,可以利用 AVO 梯度解决常规地 震在中深层砂岩顶界面辨识困难的问题。



图 1 4 类砂岩的 AVO 特征曲线

Fig. 1 AVO characteristic curves of four types of sandstone 表 1 4种 AVO 类型砂岩弹性参数

Table 1 Sandstone's elastic parameters of four AVO types

	纵波速度/	横波速度/	密度/	纵波阻抗/
	$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	$(g \cdot cm^{-3}) (g$	$\boldsymbol{\cdot} \mathrm{cm}^{-3} \boldsymbol{\cdot} \mathrm{m} \boldsymbol{\cdot} \mathrm{s}^{-1})$
I 类砂岩	5300	3050	2.55	13515
Ⅱ类 a 型砂岩	4700	2800	2.49	11703
Ⅱ类 b 型砂岩	4300	2610	2.47	10621
三类砂岩	3850	2600	2.40	9240
上覆介质	4150	2220	2.65	10997.5

1.2 界面辨别可靠性分析

结合公式原理及不同砂岩 AVO 类型,证实了 AVO 梯度在中深层砂岩顶界面辨识的可行性,进一步地,本 次研究通过岩性组合模式、储层物性及流体等参数变 化论证 AVO 梯度砂岩顶界面辨识的可靠性。

研究区属于中深层富煤层系,基于实钻数据设 计11类砂、泥、煤岩性组合模式,图2中红色为30 m 厚度气砂,黑色为1m或2m薄煤,灰色为泥岩, 不同岩性弹性参数如表2所示。图3为11类岩性 组合模式的合成地震记录及对应的AVO梯度,其中 子波采用主频25Hz的雷克子波,AVO梯度由正演 角道集,通过Shuey二项式计算得到,图中黑色虚线 为气层顶界面在常规地震及 AVO 梯度位置。分析 可知,随着岩性组合模式变化,气层顶界面在常规地 震上相位规律不清,正、负及零相位均存在;而 AVO 梯度影响较小,不同岩性组合模式下,气层顶界面均 对应负梯度。



图 2 靶区 11 类岩性组合模式

Fig. 2 Eleven types of lithological association in the target area

表 2 靶区不同岩性弹性参数

Table 2 Elastic parameters of different lithology in the target area

岩相	纵波速度/(m・s ⁻¹)	橫波速度/(m・s ⁻¹)	密度/(g・cm ⁻³)	纵波阻抗/(m・s ⁻¹ ・g・cm ⁻³)	$V_{ m p}/V_{ m s}$
泥岩	3920	2130	2.64	10349	1.84
煤层	3100	1615	1.94	6014	1.92
气层	4000	2469	2.40	9600	1.62
水层	4140	2437	2.42	10018	1.70
((a)				-3.0 -2.5 -2.0 -1.5 -1.0 -0.5 -1.0 0.5 1.0

a-常规叠加地震;b-AVO梯度

a-normal post-stack seismic; b-AVO gradient



Fig. 3 Forward modeling of different lithological associations in gas case

随后,将气砂通过 Gassmann 流体替换成水层, 图 4 为水砂模式下不同岩性组合正演分析,其中图 4a 为常规地震,图 4b 为 AVO 梯度,黑色虚线为水 层顶界面在正演常规地震和 AVO 梯度的位置。分 析可知,气层替换为水层,水层顶界面常规地震相位 规律不清,而 AVO 梯度依然表现为稳定负相位,与 气层模式认识一致。 进一步对储层物性变化分析,图 5 为砂岩孔隙 度变化对常规地震及 AVO 梯度影响分析,图 5a 为 不同孔隙下砂岩顶界面常规地震相位变化,图 5b 为 不同孔隙下砂岩顶界面 AVO 梯度相位变化,横坐标 从左往右指示孔隙度增大方向,红色虚线为砂岩顶 位置,分析可知,随着储层物性由致密砂向高孔砂岩 过渡,砂顶的常规地震相位呈现出正—零—负的变







a—不同孔隙下砂顶常规地震变化;b—不同孔隙下砂顶 AVO 梯度变化

a-normal post-stack seismic change of different porosity; b-AVO gradient change of different porosity

图 5 储层孔隙度变化下的正演对比分析

Fig. 5 Forward modeling based on reservoir porosity change

化,而 AVO 梯度则表现为稳定负值。

通过岩性组合模式、流体及物性变化正演分析, 研究表明:相比于常规地震,AVO梯度对储层顶界 面指示性较好,表现为稳定的负相位,且不受地层埋 深、压实等变化影响。基于此,直接利用反映叠前信 息的 AVO 梯度,采用叠后方法解决中深层储层精细 刻画问题。

2 叠前 AVO 梯度谱蓝化技术

2.1 技术原理及流程

谱蓝化地震高分辨率处理的实质是对测井反射

系数频谱与地震数据频谱进行匹配求取蓝化算子, 然后将算子和原始地震数据进行褶积得到优化后的 拓频数据。本次研究在此基础上,对 AVO 梯度进行 谱蓝化,提高中深层薄互砂岩刻画精度,具体流程如 下:

1) AVO 梯度地震频谱计算。选取目标井附近 AVO 梯度地震道,计算目的层段地震平均频谱 $\overline{S(w)}$:

$$\overline{S(w)} = \sum_{i=1}^{n} S_i(w) / n \quad , \tag{7}$$

式中: $S_i(w)$ 为第i道 AVO 梯度地震频谱,n为选取的地震道数。

47 卷

2)测井反射系数频谱计算。传统谱蓝化主要 针对叠后地震,求取测井波阻抗反射系数频谱,基于 AVO 梯度与泊松比变化率的相关性,本次研究依据 式(5)求取泊松比σ测井弹性曲线并计算泊松比反 射系数:

 $R_{j} = (\sigma_{j+1} - \sigma_{j})/(\sigma_{j+1} + \sigma_{j})$ 。 (8) 通过傅里叶变换求取泊松比反射系数频谱 R(w),式中, σ_{j} 为井纵向第j层的泊松比值, R_{j} 为 第j层泊松比反射系数值。

3) 谱蓝化算子求取。计算 AVO 梯度地震频谱 和泊松比反射系数频谱的谱蓝化算子,使得两者差 异最小化:

 $\min \|T(w)[B(w) \cdot \overline{S(w)} - R(w)]\|^2 + R[B(w)]$ (9)

式中: T(w) 为锥度函数; B(w) 为谱蓝化算子; R(w) 为泊松比测井反射系数谱; $\overline{S(w)}$ 为 AVO 梯 度地震平均振幅谱; R[B(w)] 为正则化函数。

4) AVO 梯度拓频数据计算。将时间域谱蓝化
 算子 B(t) 与 AVO 梯度地震 S(t) 进行褶积,得到拓频数据 S_{optimized}:

$$S_{\text{optimized}} = S(t) * B(t) \quad (10)$$

2.2 模型试算

基于靶区 A-1 井实钻数据开展叠前正演模拟, 验证 AVO 梯度谱蓝化技术辨识砂岩顶界面的可靠 性。图 6 所示为 AVO 梯度谱蓝化前后对比分析,测 井曲线为反映岩性的伽马曲线,图 6a 为 A-1 井道集 正演求取的原始 AVO 梯度,可以看出 P6、P7 砂顶 均对应负梯度,而 P8a、P8b 薄互层整体砂顶对应负 梯度,但纵向上梯度区分度不够。进一步地,将其进 行 90°相移转换成岩性厚度预测(图 6b 所示),可以 看出 AVO 梯度 90°相移剖面可以较好地识别 P6~ P8 段砂岩。

同时,针对 AVO 梯度地震纵向分辨率无法有效 区分 P8a、P8b 薄储层刻画问题,利用谱蓝化对 AVO 梯度进行拓频(图 6c 所示),分析可知,拓频后 AVO 梯度较好地区分开 P8 薄互层,P8a、P8b 砂顶均对 应负值,而其 90°相移剖面也更好地表征出这两套 薄互层(图 6d 所示),验证了叠前 AVO 梯度谱蓝化 方法的可行性。



a—原始 AVO 梯度;b—原始 AVO 梯度+90°相移;c—谱蓝化 AVO 梯度;d—谱蓝化 AVO 梯度+90°相移

a-raw AVO gradient; b-90° phase shift of raw AVO gradient; c-spectral bluing AVO gradient; d-90° phase shift of spectral bluing AVO gradient

图 6 靶区 A-1 井叠前 AVO 梯度谱蓝化效果分析

Fig. 6 Analysis of pre-stack AVO gradient spectral bluing for well A-1

3 应用实例

前面通过理论模型正演论证了 AVO 梯度谱蓝 化拓频可行性,进一步地,基于靶区实钻井、震数据 验证该方法在实际应用中的效果。A-1、A-1S 井为 XH 凹陷斜坡带钻遇的两口深探井,目的层埋深约 4 300 m,其中高部位 A-1 井 P8a、P8b 分别钻遇 10 m、 9.5 m 优质气层,低部位 A-1S 井分别钻遇 27 m 气 水层、2 m 气层,钻后测试数据揭示 P8a、P8b 高低部 位砂体各自相连通,如图 7 所示。

图 8 为过两口探井的常规地震(图 8a)及 AVO 梯度剖面(图 8b),受埋深、煤层及岩性组合影响,P6 ~P9 段砂顶常规地震相位规律不清,A-1及 A-1S 井 P6 砂顶均对应正相位,而 P7 层 A-1 井偏零相位,A-1S井为正相位,同时,高部位A-1井P8a、P8b薄互









层分别为正、负相位,低部位 A-1S 井为明显正相位; 而梯度剖面上,P6~P9 段高低部位砂体顶均对应负 梯度,仅在高部位 A-1 井 P8a、P8b 难以有效区分, 但该薄互层砂顶综合响应也为负,且 AVO 梯度在其 泥岩隔夹层存在较明显辅波特征,可能指示互层特 征。整体上,相比于常规地震,AVO 梯度在深层砂 岩界面表征上更好。

进一步对 AVO 梯度地震开展谱蓝化高分辨率 处理。为了提高靶点 P8 层拓频效果,此次选用 A-1 井进行测井谱与地震谱匹配算子求取,其中地震谱 计算采用该井邻道 P6~P9 目的层段 AVO 梯度数 据。图 9 所示为谱蓝化算子求取流程,图 9a 为 A-1 井目的层段泊松比反射系数谱计算,图 9b 为该井目 的层段地震谱计算,蓝色为平均后地震振幅谱,图 9c 为测井反射系数谱与地震谱能量匹配计算,其中 蓝色为地震平均谱,绿色为测井反射系数谱,红色曲 线为求取匹配的谱蓝化算子,图 9d 为该算子的时间 域形态,最后利用式(10)计算 AVO 梯度拓频数据。

图 10 为过 A-1、A-1S 井 AVO 梯度谱蓝化拓频 剖面,与图 8b 原始 AVO 梯度相比,拓频后 AVO 梯 度提高了对 A-1 井 P8a、P8b 纵向识别精度,两套薄 砂岩顶均对应负值,同时,低部位 A-1S 井 P8b 层 2 m 砂岩地震有一定区分性,整体上,薄互层纵向分辨 率有较大程度提高。

为了更直观对比 AVO 梯度谱蓝化前后数据对 薄储层的预测精度,将原始 AVO 梯度和拓频 AVO 梯度分别作 90°相移,使得地震界面信息判别转为 更直观的岩性厚度识别,图 11a 为原始 AVO 梯度 90°相移岩性预测剖面,图 11b 为谱蓝化拓频 AVO 梯度 90°相移岩性预测剖面,红色表征砂岩,浅蓝色 偏泥岩,对比可知,谱蓝化拓频后 AVO 梯度岩性预 测与 A-1 及 A-1S 井薄层匹配性更高,高部位 A-1 井



a—测井反射系数谱计算;b—AVO梯度频谱计算;c—谱蓝化算子匹配;d—时间域谱蓝化算子

a-calculation of well-log's reflection spectrum; b-calculation of AVO gradient spectrum; c-calculation of bluing operator; d-bluing operator in the time domain

图 9 谱蓝化算子求取流程





图 10 过探井 AVO 梯度谱蓝化拓频剖面





Fig. 11 Lithology prediction comparison before(a) and after(b) AVO gradient spectral bluing

P8a 实钻 10 m,反演厚度 12 m,相较于拓频前反演的 16 m,厚度精度更高,P8b 实钻 9.5 m,反演厚度 8.5 m,优化后反演不仅有效地凸显 P8b 且厚度误差较小(约 10.5%);低部位 A-1S 井 P8a 实钻厚度 27 m,拓频前、后精度相近,但 2 m 的 P8b 薄气层响应得到较好凸显,整体上,基于 AVO 梯度谱蓝化的岩性预测方法在保留较厚储层预测精度基础上,薄层刻画有较大改善。

4 结论及讨论

中深层砂、泥岩阻抗混叠严重,利用常规地震表 征岩性存在多解性,本文提出利用 AVO 梯度辨别 砂、泥岩界面信息,通过岩性组合、物性及流体参数 变化论证了该地震属性辨别砂岩顶界面的可行性及 可靠性,为中深层储层刻画提出了一种行之有效的 新方法。

传统的谱蓝化拓频主要应用于叠后地震数据, 在中深层应用局限性较大。结合对砂、泥岩界面辨 别更加敏感的 AVO 梯度信息,本文提出一种基于 AVO 梯度的谱蓝化拓频技术,通过理论模型试算及 实际工区数据应用,验证了该方法在中深层高分辨 率处理的适用性。

AVO 梯度计算与 CRP 道集质量关联性强,较差的 CRP 道集会影响 AVO 梯度计算的精度,即 AVO 梯度抗噪性一般,因此,在使用 AVO 梯度砂、 泥岩界面识别中,需要评估或优化 CRP 道集质量, 这也是今后进一步研究需要讨论的问题。

参考文献(References):

[1] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工 程剖析[M]. 北京:石油工业出版社,1994.

Li Q Z. The way to obtain a better resolution in seismic prospecting: A systematical analysis of high resolution seismic exploration [M]. Beijing; Petroleum Industry Press, 1994.

 [2] 刁瑞.提高地震分辨率处理效果定量评价方法研究[J].物探 与化探,2020,44(2):381-387.
 Diao R. The quantitative evaluation method of seismic high resolu-

tion processing effect [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2):381–387.

[3] 陈传仁,周熙蘘.小波谱白化方法提高地震资料的分辨率[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(6):703-709.

Chen C R, Zhou X X. Improving resolution of seismic data using wavelet spectrum whitening $[\,J\,]$. OGP ,2000 , 35(6) :703–709.

 [4] 孙学凯,孙赞东,谢会文,等. 非稳态地震稀疏反褶积[J]. 石油 地球物理勘探,2015,50(2):260-266.
 Sun X K,Sun Z D,Xie H W, et al. A nonstationary perspective on

sparse deconvolution [J]. OGP, 2015, 50(2):260–266.

- [5] 邓儒炳,阎建国,陈琪,等. 一种基于连续补偿函数的时变增益 限反Q滤波方法[J]. 物探与化探,2021,45(3):702-711.
 Deng R B, Yan J G, Chen Q, et al. A new time-varying gain limits inverse Q filtering with the continuous compensation function[J].
 Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3):702 -711.
- [6] Braga I L S, Moraes F S. High resolution gathers by inverse Q filtering in the wavelet domain [J]. Geophysics, 2013, 78(2):53-61.
- [7] 徐倩茹,孙成禹,乔志浩,等. 基于 Gabor 变换的地震资料高分 辨率处理方法研究[J]. 断块油气田,2016,23(4):460-464.
 Xu Q R, Sun C Y, Qiao Z H, et al. High-resolution processing method of seismic data based on Gabor transform[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2016,23(4):460-464.
- [8] Blache-Fraser G. Increasing seismic resolution using spectral blueing and colored inversion; Cannonball field, Trinidad [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23:2586.
- [9] Neep J P. Time-variant colored inversion and spectral blueing [C]//Eage Conference & Exhibition Incorporating Spe Europec, 2014.
- [10] 杨瑞召,赵争光,马彦龙,等.利用谱蓝化和有色反演分辨薄煤 层[J].天然气地球科学,2013,24(1):156-161.
 Yang R Z,Zhao Z G,Ma Y L, et al. Thin coal bed resolution by using seismic spectral blueing and colored inversion[J]. Nature Gas Geoscience,2013,24(1):156-161.
- [11] 陈文雄. 渤海西南部新近系超薄储层定量预测技术研究与应用[J]. 地球物理学进展,2019,34(2):694-701.
 Chen W X. Research and application of quantitative prediction technique for ultrathin reservoir in the neogene of southwesterm Bohai sea[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2):694-701.
- [12] 杨培杰.复数域约束最小二乘拓频[J].石油地球物理勘探, 2021,56(6):1244-1253.
 Yang P J. Constrained complex-domain least-squares spectrum blueing[J].OGP,2021,56(6):1244-1253.
- [13] Kazemeini S H, Can Y, Juhlin C, et al. Enhancing seismic data resolution using the prestack blueing technique: An example from the Ketzin CO₂ injection site, Germany[J]. Geophysics, 2010, 75(6): 101-110.
- [14] 李贤兵,赵俊杰,晋剑利,等. 叠前谱蓝化提频技术在乍得 Baob 油田储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(6): 1343-1348.

Li X B, Zhao J J, Jin J L, et al. Pre-stack spectrum blueing frequency increasing technique: A case study on reservoir prediction in Chad Baob Oilfield[J]. OGP,2020,55(6):1343-1348.

- [15] Shuey R T. A simplification of Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50(9):609-614.
- [16] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands[J]. Geophysics, 1989, 54(6):680-688.
- [17] Castagna J P, Swan H W, Foster D J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation [J]. Geophysics, 1998, 63 (3): 948 – 956.
- [18] 王迪,张益明,刘志斌,等. AVO 定量解释模板在 LX 地区致密 气"甜点"预测中的应用[J]. 石油物探, 2020, 59(6):936-948.

Wang D, Zhang Y M, Liu Z B, et al. Application of an AVO template to identify sweet spots in a tight sandstone reservoir in the LX area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 59(6):936 -948.

[19] 付琛,廖键,陈殿远,等. 根据 AVO 相对变化识别流体的新方 法[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5):62-72.

Fu C, Liao J, Chen D Y, et al. A new method for fluid identification

based on relative changes in AVO [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5):62-72.

[20] 刘力辉,李建海,杨晓,等. 叠前 AVO 属性的地震岩性学探索 与实践研究[J]. 石油物探, 2013, 52(3): 247-252. Liu L H, Li J H, Yang X, et al. Exploration and practical study of pre-stack AVO property on seismic lithology [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(3):247-252.

Application of the AVO gradient-based spectral bluing technique in the characterization of thin sandstones in moderately deep strata

LIU Qing-Wen, LI Jian, QIN De-Wen

(Shanghai Branch of CNOOC Co. Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: The conventional spectral bluing technique is mainly utilized for post-stack seismic frequency expansion. It is applicable to the shallow strata where sandstones and mudstones can be effectively identified based on the wave impedance of logs. However, this technique has many limitations for the impedance aliasing zones of moderately deep strata. The amplitude versus offset (AVO) gradient reflects the change in the relative reflection coefficient with offset and is positively correlated with the rate of change in Poisson's ratio, which can distinguish between sandstones and mudstones in moderately deep strata. Through forward modeling, this study first proved the reliability and stability of the AVO gradient in identifying the top interface of sandstones in moderately deep strata according to the changes in parameters such as lithologic association, physical properties, and fluids. Furthermore, to improve the characterization precision of thin sandstone interbeds in moderately deep strata, this study proposed a AVO gradient-based spectral bluing for seismic frequency expansion. The model tests and practical applications show that the spectral bluing based on AVO gradient can directly identify the information on reservoir interfaces and simplify the multi-parameter lithology prediction method based on CRP gathers or partial angle stack data. Moreover, the new technique proposed in this study can effectively characterize the thin sandstones in deeply buried strata in the XH sag and provides a reference for high-resolution seismic processing of moderately deep strata.

Key words: moderately deep strata; AVO gradient; spectral bluing; high-resolution seismic processing; thin reservoir characterization

(本文编辑,叶佩)