

松辽盆地北部中央古隆起带基底储层 AVO 特征模拟及时频特征分析研究

姜传金, 戴世立*, 张广颖, 陈鸿安, 李本彬, 王海娇

中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

* 通信作者, daishili@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-01-10

摘要 中央古隆起带位于徐家围子断陷和古龙断陷之间, 是长期继承性发育的古隆起。由于中央古隆起带基岩潜山勘探面积大, 油气成藏条件好, 是目前风险勘探探索的重点领域之一。中央古隆起带基底的岩性主要为花岗岩和变质岩, 但由于储集层复杂, 储层物性较低, 以裂缝为主, 勘探程度低, 对裂缝型储层地震响应的研究较少。本文针对中央古隆起带基底风化壳地层结构, 利用岩石物理、测井、地震解释等成果, 明确基底风化壳地层地球物理参数特征, 建立基底地层地质模型, 利用粘弹性波动方程模拟不同含气饱和度地层的 AVO 响应和地震波场, 明确中央古隆起带基底盖层—风化淋滤层界面、风化淋滤层—裂缝层界面、裂缝层—内幕界面的 AVO 曲线都基本表现为反射振幅与偏移距成负相关关系, 含水饱和度为 100% 时, 反射振幅是最大的, 当含水饱和度变为 50% 和 0% 时, 振幅明显下降, 说明当风化淋滤层中含气时, 振幅会发生相对明显的下降。基于基底风化壳地质模型正演模拟地震记录并时频分析, 明确当地层 100% 含气时, T_3 强时频谱之下出现的弱时频谱相比 100% 含水的要强。整体上, 基底风化壳储层含水和含气的 AVO 特征和时频特征存在差异, 可以作为流体识别的可能指标。

关键词 AVO 响应; 时频分析; 风化壳; 裂缝型储层

Simulation of AVO features and analysis of the time-frequency characteristics of the basement reservoir of the ancient central uplift zone in the northern Songliao Basin

JIANG Chuanjin, DAI Shili, ZHANG Guangying, CHEN Hongan, LI Benbin, WANG Haijiao

Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

Abstract The paleo central uplift belt is located between the Xujiaweizi and Gulong fault depressions, as a long-term inherited palaeouplift. Due to the large exploration area and well conditions for hydrocarbon accumulation in the bedrock buried-hill, the paleo central uplift belt has become one of the major areas of risk exploration at present. The lithology of the basement of the paleo central uplift belt is mainly granite and metamorphic rocks. However, because of the complexity of the reservoirs and low physical characteristics of reservoirs with fractures as the major reservoir space, research into the seismic

引用格式: 姜传金, 戴世立, 张广颖, 陈鸿安, 李本彬, 王海娇. 松辽盆地北部中央古隆起带基底储层 AVO 特征模拟及时频特征分析研究. 石油科学通报, 2022, 04: 505-514

JIANG Chuanjin, DAI Shili, ZHANG Guangying, CHEN Hongan, LI Benbin, WANG Haijiao. Simulation of AVO features and analysis of the time-frequency characteristics of the basement reservoir of the ancient central uplift zone in the northern Songliao Basin. Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 505-514. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693. 2022.04.043

response of fractured reservoirs is not enough as there is a low degree of exploration. In this paper, based on the formation structure of the basement weathering crust in the paleo central uplift belt, the characteristics of geophysical parameters of basement weathering crust formation are defined by the results of rock physics, logging and seismic interpretation, and the geological model of the basement is established. The AVO response and seismic wave field of strata with different gas saturation are simulated by viscoelastic wave equations, the AVO curves of caprocks of the paleo central uplift belt–weathering leaching layer interface, the AVO curves of the weathering leaching layer–fracture layer interface, and the AVO curves of the fracture layer–inner layer interface all reflect that the reflection amplitude is negatively correlated with the offset. When the water saturation is 100%, the reflection amplitude is the biggest, when water saturation changes to 50% and 0%, the amplitude obviously decreases. This indicates that the amplitude will decrease significantly when the weathering leaching layer contains gas. Based on the forward modeling of seismic records and time-frequency analysis of the basement weathering crust geological model, it is clear that when the local layer contains 100% gas, the weak time spectrum under the T_3 strong time spectrum is stronger than that with 100% water content. On the whole, the AVO characteristics and time-frequency characteristics of water-bearing and gas-bearing reservoirs in basement weathering crust are different, which can be used as possible indicators for fluid identification.

Keywords AVO responses; time-frequency characteristics; weathering crust; fractured reservoir

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.043

0 引言

从20世纪80年代中后期以来,基岩油气藏勘探曾一度陷入低潮。1998年大港探区发现千米桥基岩凝析气藏,再次引起人们对基岩油气藏勘探的关注^[1]。进入21世纪,随着科学技术的进步,各种新理论、新技术、新方法的提出和应用,使基岩油气藏的研究提高到了一个新的水平。基岩油气藏的勘探已由寻找大型的、明显的、简单的潜山转移到寻找更隐蔽的、复杂的潜山;勘探目标向深部潜山、基岩内幕转变。2005年和2008年,分别在辽河拗陷西部凹陷兴隆台太古宇和霸县凹陷文安斜坡寒武系基岩内幕获得高产工业油气流。2010年,在大民屯凹陷负向构造的基岩块体中获得工业油流。这些新领域的突破也标志着基岩勘探进入了新的勘探阶段^[2-6]。

中央隆起带位于松辽盆地北部,位于徐家围子断陷和古龙断陷之间,南北高中部低,南部宽缓、北部狭窄,发育有永乐、肇州西、昌德、卫星、升平及汪家屯等6个三级构造凸起构造单元,基底界面(T_3)埋深2700~3500 m。自上世纪70年代开始,中央隆起带基岩勘探经历“探索发现阶段、兼探阶段、风险勘探突破阶段”三个阶段。2016年以来,针对基底风化壳勘探见到较好效果,证实中央隆起带具有天然气资源和勘探潜力。但由于储集层为火成岩,储层复杂,勘探程度低,对储层地震响应特征的研究相对较少。开展中央隆起带火成岩储层的地震响应特征的探索,摸索孔隙-裂缝型地质模型建立及正演模拟分析^[7],研究储层的地震响应规律,对实际储层预测具有一定的指导作用。

中央隆起带基底岩性为花岗岩和变质岩,基底顶面为 T_3 反射层。基底地层从上往下可以分为风化淋滤层、裂缝层、基岩内幕。基底地层因风化淋滤程度不同,在纵向上具有一定的成层性。因此,本文针对中央隆起带基底花岗岩和变质岩地层,利用岩石物理、测井、地震解释等成果,建立风化壳三层层状地层模型,利用黏弹性波动方程模拟不同含气饱和度地层的AVO响应和地震波场,分析其时频特征,与实际地震资料的AVO响应和时频谱进行比较,明确风化壳储层的AVO响应及时频谱的特征,以揭示风化壳储层的地震响应规律,为储层识别提供线索。

1 AVO特征模拟和分析

AVO(振幅与偏移距)技术始于上个世纪的80年代^[8]。由于AVO响应与界面两侧地层的弹性参数、流体性质等因素有关,利用AVO响应,可以识别真假“亮点”,定量地获得地层的纵横波速度、密度等参数,进一步可以预测流体^[9],因此AVO技术在当今的地震资料解释中起着十分重要的作用。

对于弹性介质而言,可以利用Zoeppritz方程或者其近似方程获得AVO响应^[8],对于黏弹性介质,可以利用类似的方法^[10]获得。AVO相应曲线也可以通过波动方程正演模拟的方法得到。通过波动方程模拟的方法获得AVO曲线的过程是:设置由两层均匀介质构成并具有水平分界面的模型;设定两层介质的速度、密度等参数;用网格对模拟介质进行剖分;用有限差分等方法模拟不同入射角平面波入射波场,根据入射角分别设置入射波和反射波接收点,接收模拟的

入射波和反射波场；通过纵横波分离，获得接收点处的纵波波形；计算两个接收点处入射波和反射波的能量，并求反射波与入射波的能量比值(即反射系数的大小)，根据入射和反射信号的极性，确定反射系数的符号，最终求得该入射角的反射系数。考虑到地层含气后导致地层的吸收衰减效应，故本文的AVO曲线是利用分数阶黏滞波动方程^[10]进行空间伪谱法、时间差分法模拟得到的。选用分数阶黏滞波动方程的原因在于，它能较好地刻画地震频段常Q模型，即Q与频率无关^[11]。

利用波动方程模拟的方法得到AVO曲线的优势是比较简单，不需要推导复杂的包含实部和虚部的Zoeppritz方程，比较适用于复杂的黏弹性介质的AVO响应的获取。

根据工区的地震剖面和层位解释结果，结合测井速度和速度谱资料以及岩石物理测试和建模结果，可以将时间域解释层位转化为深度域层位，从而建立深度域地质模型。由于 T_5 界面之下为裂缝型介质，裂缝中可能充填不同比例的流体，因此，将裂缝中流体设为100%水饱和、50%水饱和以及0%水饱和三种情形，0%水饱和意味着100%气饱和。

根据测井资料和岩心观察，裂缝的发育程度低，因此，本文用各向同性介质表示盖层、风化淋滤层、裂缝层和内幕层。根据岩石物理建模结果，获得表1~3所示的不同含水饱和度的纵横波速度和密度值。因篇幅的限制，仅列出LX3井含水饱和度为100%、50%和0%时的纵横波速度、密度和纵横波品质因子。从表1~3可见，对于三种饱和度情况，密度保持不变，这是因为背景介质的孔隙度非常低。横波速度值有所变化，与通常认为充填流体不会导致横波速度的变化有所差异。这是因为常规的Gassmann理论不考虑孔隙结构的复杂性，所以预测不同流体饱和和横波模量不变，速度基本不变。但因为不同尺度裂缝的存在造成横波模量也会随着含气饱和而降低，所以饱和气储层横波速度也会有所降低。Q值主要和含气饱和度相关，完全饱水或者完全饱气Q值都偏高，而当水气混合时，由于流体流动会导致较强衰减，因而Q值变小。

图1至图3分别为LT1、LT2和LX3井处盖层-风化淋滤层、风化淋滤层-裂缝层、裂缝层-内幕界面3种饱和度AVO曲线，不同颜色表示不同含水饱和度，蓝色表示0%含水，红线表示50%含水，黄线表

表 1 LX3 井含水饱和度为 100% 时的纵横波速度、密度和纵横波品质因子

Table 1 Velocities of P-wave and S-wave, density and P-wave and S-wave quality factors of LX3 well when water saturation is 100%

参数	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(g/cm^3)$	Q_p	Q_s
盖层	4783	2947	2560	200	200
风化淋滤层	5689	2880	2643	120	80
裂缝层	5746	3109	2623	120	80
内幕	5839	3325	2622	150	100

表 2 LX3 井含水饱和度为 50% 时的纵横波速度、密度和纵横波品质因子

Table 2 Velocities of P-wave and S-wave, density and P-wave and S-wave quality factors of LX3 well when water saturation is 50%

参数	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(g/cm^3)$	Q_p	Q_s
盖层	4783	2947	2560	200	200
风化淋滤层	5603	2839	2643	80	40
裂缝层	5680	3075	2623	50	30
内幕	5450	3256	2792	150	100

表 3 LX3 井含水饱和度为 0% 时的纵横波速度、密度和纵横波品质因子

Table 3 Velocities of P-wave and S-wave, density and P-wave and S-wave quality factors of LX3 well when water saturation is 0%

参数	$V_p/(m/s)$	$V_s/(m/s)$	$\rho/(g/cm^3)$	Q_p	Q_s
盖层	4783	2947	2560	200	200
风化淋滤层	5573	2824	2643	100	50
裂缝层	5642	3055	2623	80	40
内幕	5450	3256	2792	150	100

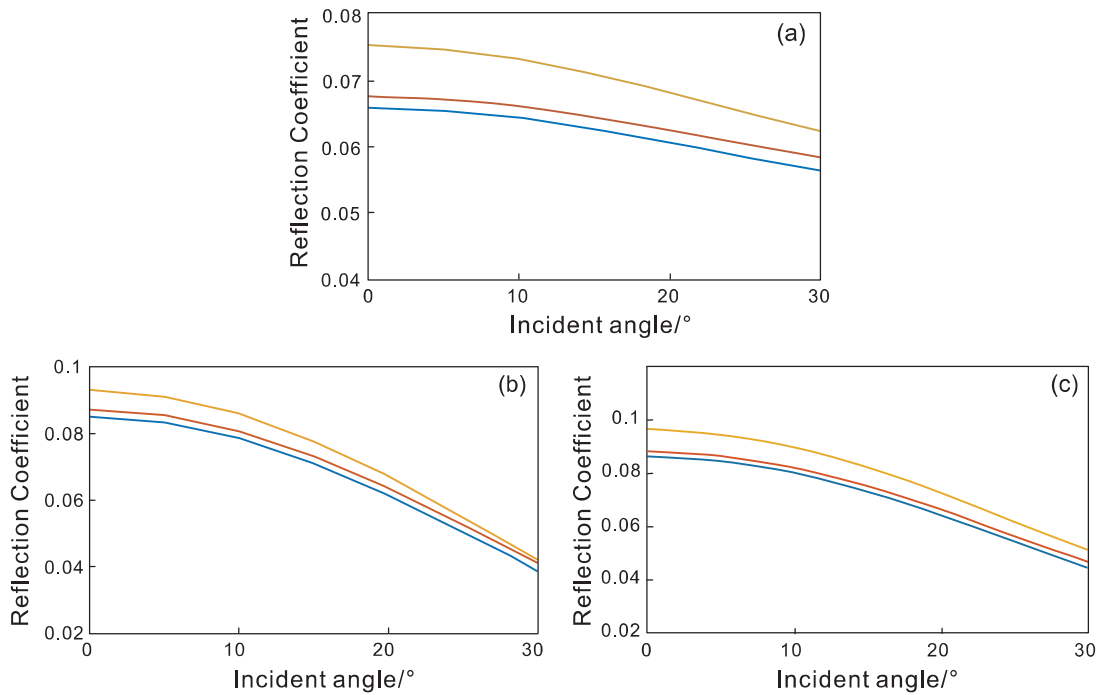


图1 (a)LT1井、(b)LT2井和(c)LX3井处盖层-风化淋滤层界面三种饱和度AVO曲线,不同颜色表示不同含水饱和度,蓝线-0%含水,红线-50%含水,黄线-100%含水,纵横波速度比来自于测井资料

Fig. 1 AVO curves of three saturation in caprocks- weathering leaching layer interface of (a) LT1 well, (b) LT2 well and (c) LX3 well, different colours express different water saturation, blue line- water saturation is 0%, red line- water saturation is 50%, yellow line- water saturation is 100%, the speed ratio of P-wave and S-wave comes from logging

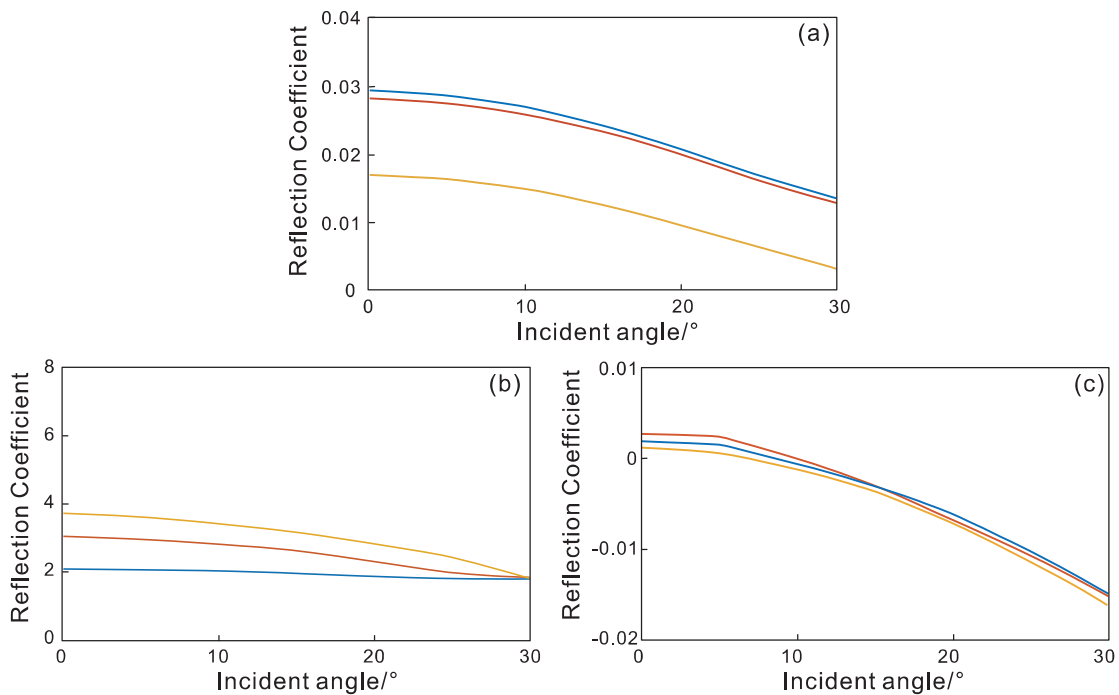


图2 (a)LT1井、(b)LT2井和(c)LX3井处风化淋滤层-裂缝层界面三种饱和度AVO曲线,不同颜色表示不同含水饱和度,蓝线-0%含水,红线-50%含水,黄线-100%含水,纵横波速度比来自于测井资料

Fig. 2 AVO curves of three saturation in the weathering leaching layer - fracture layer interface of (a) LT1 well, (b) LT2 well and (c) LX3 well, different colours express different water saturation, blue line- water saturation is 0%, red line- water saturation is 50%, yellow line- water saturation is 100%, the speed ratio of P-wave and S-wave comes from logging

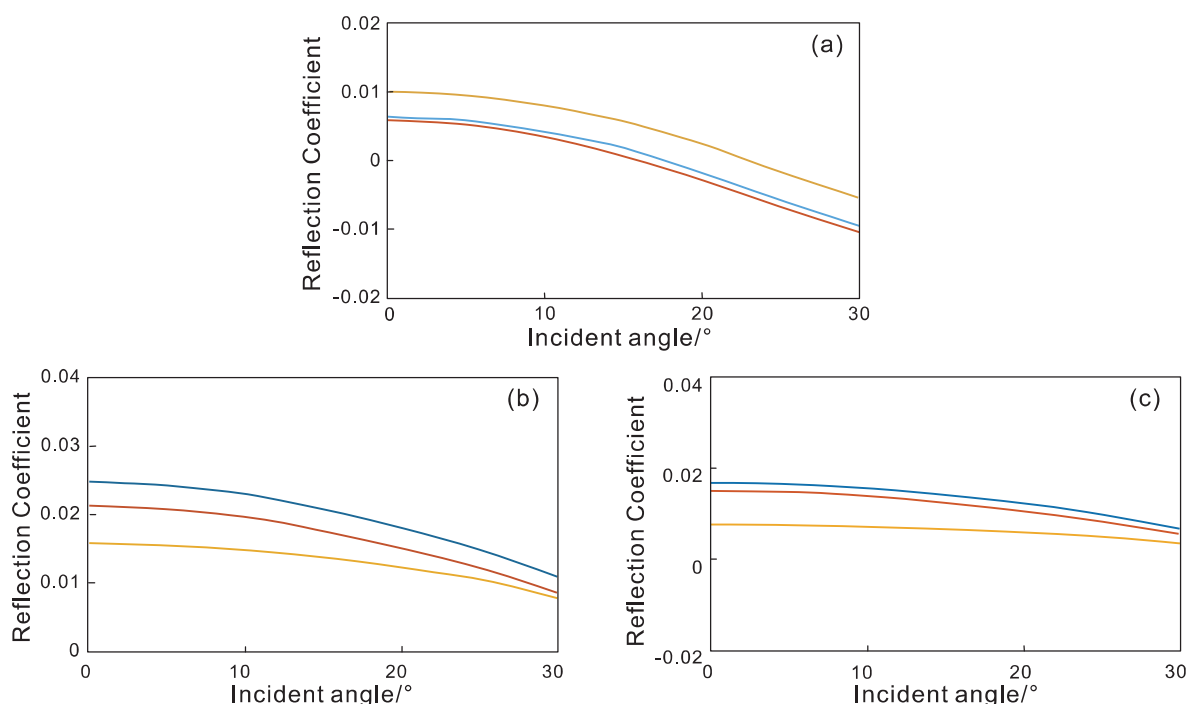


图 3 (a)LT1 井、(b)LT2 井和(c)LX3 井处裂缝层-内幕界面三种饱和度 AVO 曲线，不同颜色表示不同含水饱和度，蓝线-0% 含水，红线-50% 含水，黄线-100% 含水，纵横波速度比来自于测井资料

Fig. 3 AVO curves of three saturation in the fracture layer – inner layer interface of (a) LT1 well, (b) LT2 well and (c)LX3 well, different colours express different water saturation,blue line– water saturation is 0%, red line– water saturation is 50%, yellow line– water saturation is 100%,the speed ratio of P-wave and S-wave comes from logging

示 100% 含水，纵横波速度比来自于测井资料(盖层和基底的纵横波分别为 2.00 和 1.80)。从图 1 可见，盖层-风化淋滤层界面 3 种饱和度 AVO 曲线的振幅相对较大，这与盖层和风化淋滤层的阻抗差较大有关。反射振幅与偏移距成负相关关系。当风化淋滤层含水饱和度为 100% 时，振幅最大，含气时，振幅有所减小，但不同含气饱和度间振幅差异较小。含气时振幅较 100% 饱水时小，在某种程度上可以作为含气性的一个指标。风化淋滤层-裂缝层界面 3 种饱和度 AVO 曲线(图 2)的振幅值都偏小，这是由风化淋滤层和裂缝层的波阻抗差异小而导致的。对于 LT1 井，含水饱和度为 100% 是振幅最小，含气时振幅有所增大。对于 LT2 井，100% 含气时振幅最大，含气时振幅有所减小。对于 LX3 井，3 种饱和度的 AVO 曲线几乎重合。裂缝层-内幕界面三种饱和度 AVO 曲线(图 3)100% 饱水和含气时有差异，但振幅值都很小，区分度低。

模拟的 AVO 曲线是否合理，需要用实际资料进行验证。图 4 是 LX3 井处的共反射点(CRP)道集， T_3 反射拉平，说明偏移成像的速度模型比较准确。图中还标示了根据解释结果得到的盖层底界面、风化淋滤层-裂缝层界面和裂缝层-内幕界面的位置，用水平

实线表示。从实际 CRP 道集得到的 AVO 曲线为图 5，在图中标示了盖层底界面、风化淋滤层-裂缝层界面和裂缝层-内幕界面 3 条 AVO 曲线，用黑色虚线对振幅的变化趋势进行了拟合。比较图 1c~3c 和图 5 中的 3 条 AVO 曲线可知，模拟的基底反射的 AVO 曲线的变化规律与图 5 中对应的 AVO 曲线的变化规律一致，说明模拟获得的 AVO 曲线代表了实际 AVO 曲线的特征，但对于其它两个界面的 AVO 曲线，由于反射振幅很小，受噪声、分辨率等因素的影响，模拟的风化淋滤层-裂缝层界面 AVO 曲线与实际 AVO 曲线有所差异。相对 T_3 反射而言，风化淋滤层-裂缝层界面和裂缝层-内幕界面都属于弱反射界面，形成的反射能量很弱，如果信噪比低，在剖面上可能难以连续追踪。

2 地震记录的时频分析

地震波的频谱是一种地震波动力学的属性。地震波频谱特性的研究有助于识别岩性，预测地层的含油气特性。由于地震波频谱信息包含地下流体、岩性、地质结构等特性，如果发现它们关联特性，在一定的条件下，地震信号的频谱分析可用来预测地层岩性和

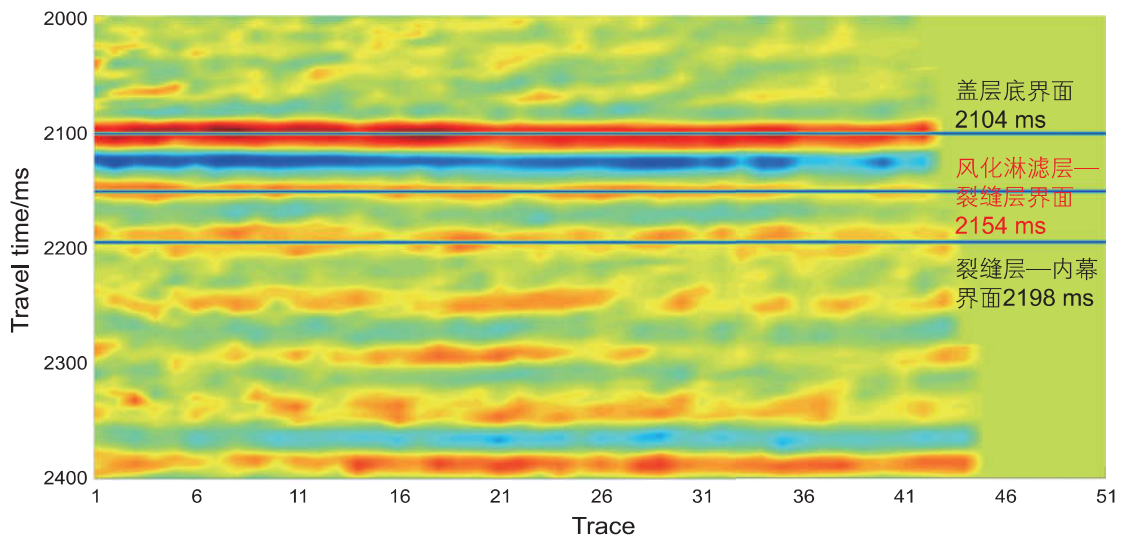


图4 LX3井处的目的层段的CRP道集

Fig. 4 CRP gathers of objective interval of LX3 well

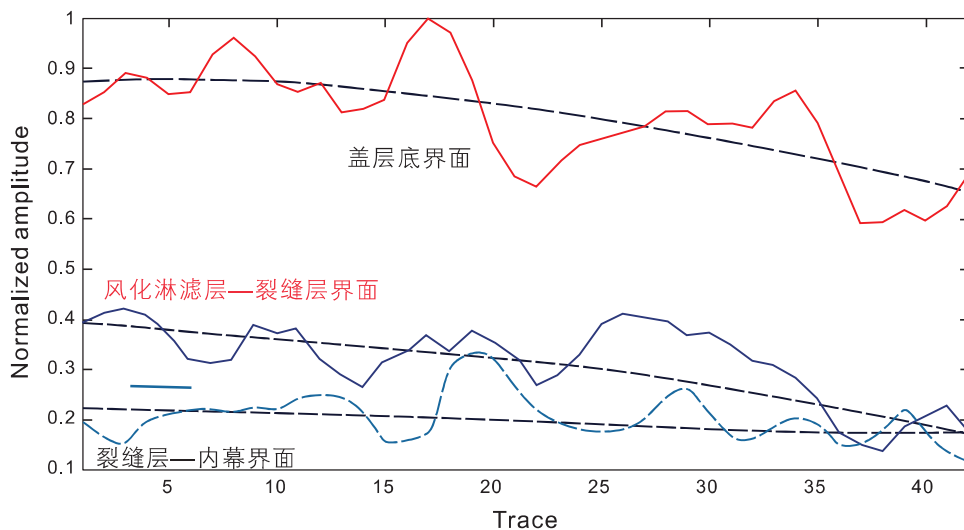


图5 LX3井处从实际CRP道集拾取的盖层底界面(红线)、风化淋滤层-裂缝层界面(蓝线)和裂缝层-内幕界面(浅蓝色虚线)反射波振幅随偏移距的变化,以及从实际振幅曲线拟合的振幅曲线(黑色虚线)

Fig. 5 Variation with offset of reflected wave amplitude in caprocks bottom boundary (red line), the weathering leaching layer-fracture layer interface (blue line) and the fracture layer-inner layer interface (light blue dashed line) from real CRP gathers of LX3 well

含油气性。

采用时频分析方法(例如短时傅立叶变换或S变换等)^[12],能达到同时在时间域和频率域对信号进行分析的目的,得到信号在不同时刻的频谱特性。

图6是根据测井分层和地震解释结果构建的过LT1、LT2和LX3井的地质模型,过LX3井的地质模型的参数参见表1~表3。利用分数阶黏滞波动方程^[13]进行空间伪谱法、时间差分法模拟得到地震波场,震源子波是雷克子波,主频为30 Hz。在进行时

频分析时,采用的地震数据是井的位置处的深度偏移叠加记录(如图7所示,其为LX3井的偏移叠加剖面)经深时转换后的数据。图8是LT1、LT2和LX3井处不同含水饱和度(100%、50%、0%)层状地质模型的合成地震记录及其时频谱,图9是3个井处实际地震资料的时频谱。由于受地震资料分辨率的限制,无法单独分析盖层底界面、风化淋滤层-裂缝层界面和裂缝层-内幕界面反射波的时频特性,因此,将3个界面的混叠记录作为整体加以分析。为了便于对比,将

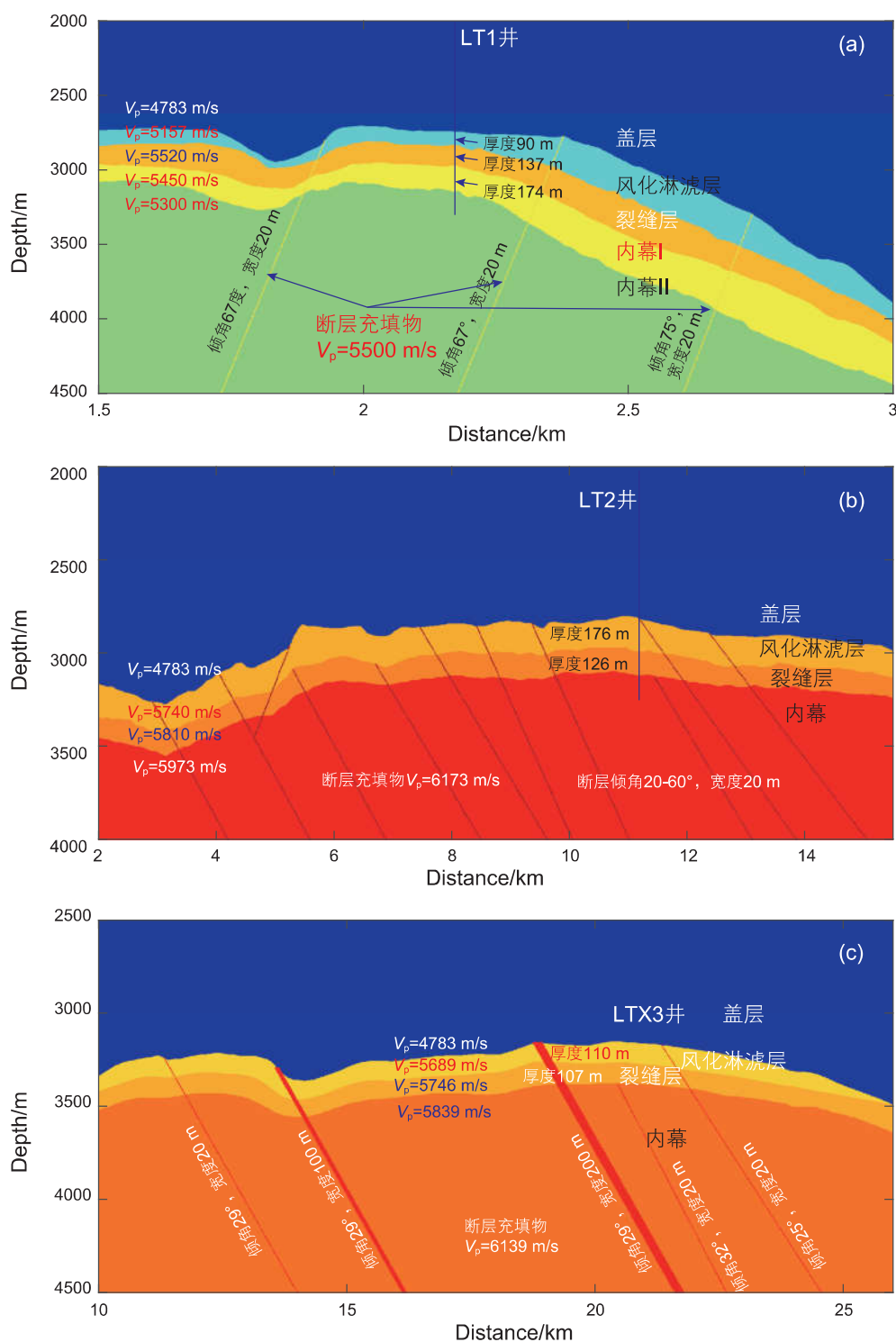


图 6 (a)LT1、(b)LT2 和 (c)LX3 井层状地层模型 (地层 100% 含水的情况)

Fig. 6 Laminar formation model of (a) LT1 well (b) LT2 well (c) LX3 well, when water saturation of formation is 100%

LX3 井实际地震数据的时频谱与含水率 100% 和含气率 100% 的合成地震记录的时频谱示于图 10, 可见, 在目的层段实际时频谱与合成地震记录的时频谱相似度高。为了便于与不同含水饱和度的模拟结果的时频谱进行对比, 将其画在同一个图中, 如图 11 所

示。比较图 11 中的合成记录的时频谱知, 当地层含气 100% 时, T_3 强时频谱之下出现的弱时频谱相比含水饱和度 100% 的要强, 3 个井 (图 8) 都有此表现, 但强弱不同, LT2 井和 LX3 井的异常更明显一些, LX3 井的异常最显著。

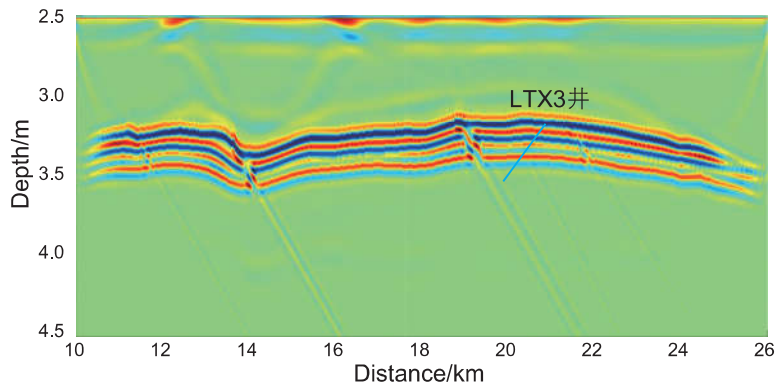


图 7 过LX3井偏移叠加剖面

Fig. 7 Section of migration stack along LX3 well

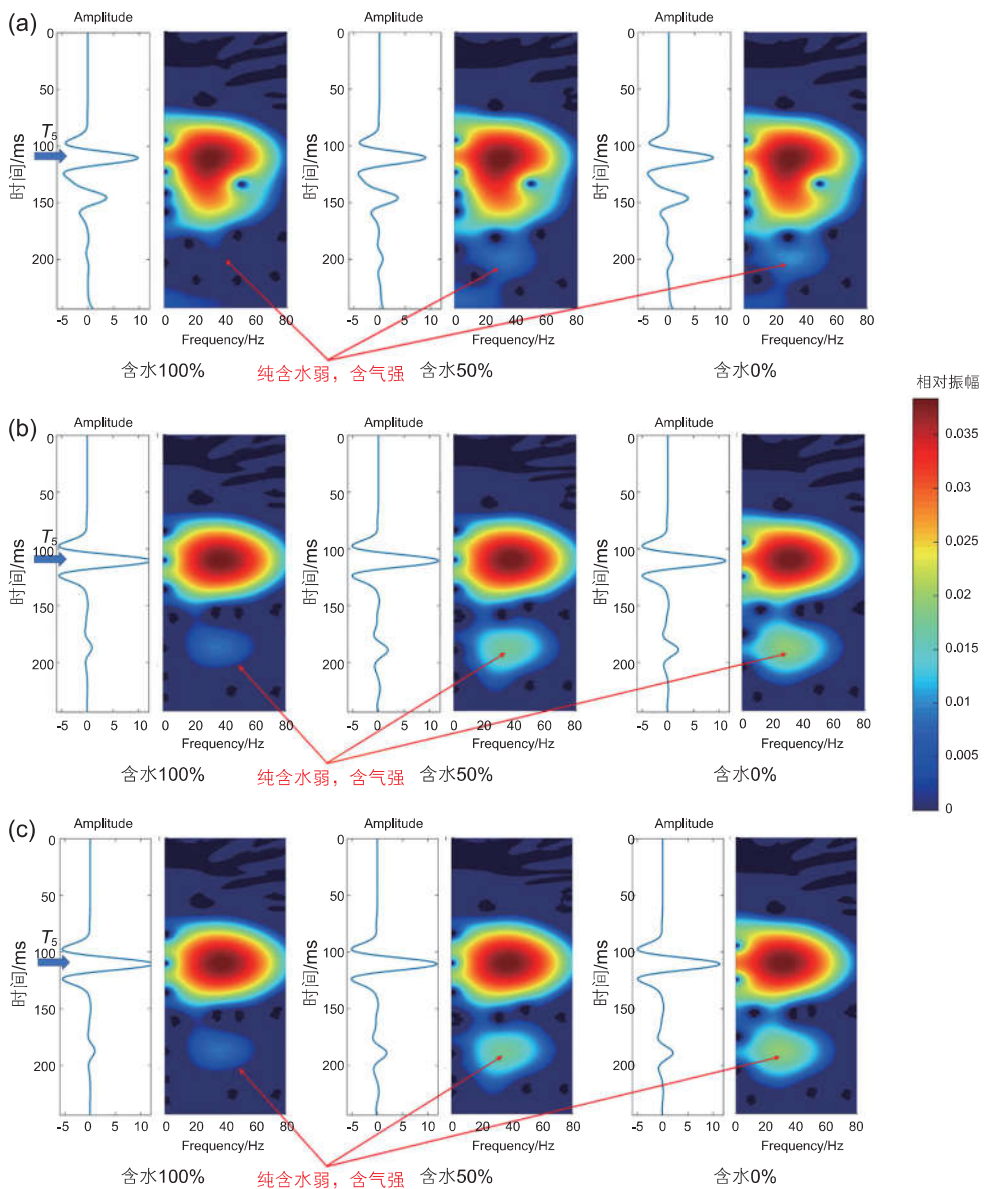


图 8 (a)LT1、(b)LT2 和 (c)LX3 井处不同含水饱和度层状模型合成地震记录及其对数时频谱，强振幅为 T_5

Fig. 8 Synthetic record and its logarithmic time-frequency spectrum of laminated model of (a) LT1 well, (b) LT2 well and (c) LX3 well with different water saturation, strong amplitude represents T_5

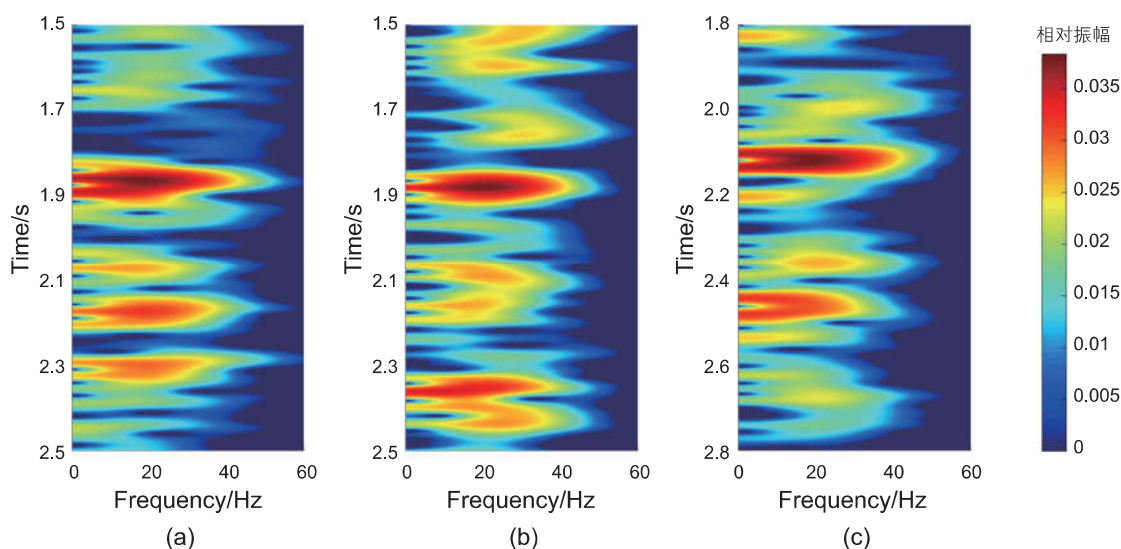


图 9 (a) LT1、(b)LT2 和 (c)LX3 井的对数时频谱, LT1 井约 1.85 s、LT2 井约 1.8 s、LX3 井约 2.13s 处为 T_5
 Fig. 9 Logarithmic time-frequency spectrum of (a) LT1 well, (b) LT2 well and (c)LX3 well, T_5 respectively appears on 1.85 s in LT1 well, 1.8 s in LT2 well and 2.13 s in LX3 well

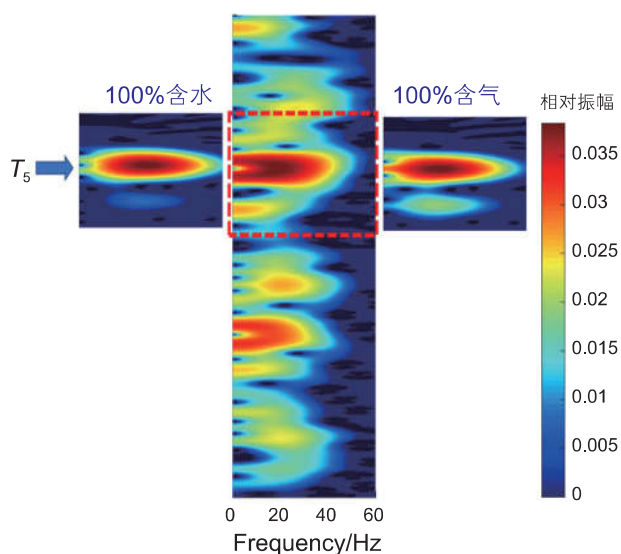


图 10 LX3 井实际地震数据的时频谱与合成记录的对数时频谱对比
 Fig. 10 Comparison with time-frequency spectrum of seismic data and logarithmic time-frequency spectrum of synthetic record of LX3 well

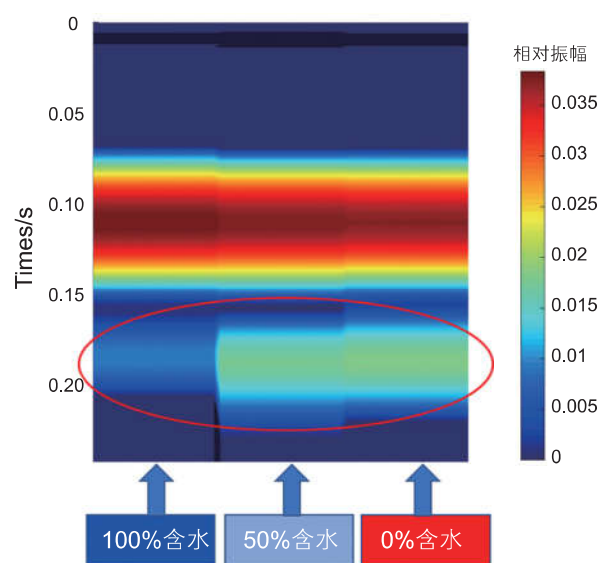


图 11 LX3 井含水饱和度 100%、50% 和 0% 的模拟地震数据的 20 Hz 时频谱
 Fig. 11 Time-frequency spectrum of simulate seismic data at 20 Hz of LX3 well when water saturation respectively becomes 100%, 50% and 0%

3 结论

中央古隆起带基底盖层-风化淋滤层界面、风化淋滤层-裂缝层界面、裂缝层-内幕界面的 AVO 曲线都基本表现为反射振幅与偏移距成负相关关系。基底盖层-风化淋滤层界面形成强反射, 但风化淋滤层-裂缝层界面、裂缝层-内幕界面的反射弱。对于三个

井的盖层-风化淋滤层界面, 含水饱和度为 100% 时, 反射振幅是最大的, 当含水饱和度变为 50% 和 0% 时, 振幅明显下降, 说明当风化淋滤层中含气时, 振幅会发生相对明显的下降, 这在某种程度上可以作为含气性的一个指标。

通过建立的地质模型进行正演模拟得到的地震记录的时频分析知, 当地层 100% 含气时, T_5 强时频谱之下出现的弱时频谱相比 100% 含水的要强, 但各

井的强弱不同, LT2井和LX3井的异常更明显一些, LX3井的异常最显著。这个特征可以作为地层含气性的可能的判别依据之一。

总之, 基底火成岩由于风化程度的不同, 裂缝发

育程度也不同, 不同发育程度的裂缝层可以形成弱反射, 裂缝含气时的反射波的AVO特征、时频特征与水饱和时的特征有较明显的差异, 能够反映裂缝中流体的性质。

参考文献

- [1] 李建英, 卢刚臣, 孔凡东, 等. 千米桥潜山奥陶系储层特征及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 367-371. [LI J Y, LU G C, KONG F D, et al. Reservoir characteristics and pore evolution of Ordovician in Qianmiqiao Buried Hill[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 367-371.]
- [2] 李德生. 中国油气勘探的理论与实践[J]. 世界科技研究与进展, 2003, 25(4): 1-6. [LI D S. Theory and practice of oil & natural gas exploration in China[J]. World SCI TECH R & D, 2003, 25(4): 1-6.]
- [3] 李军, 刘丽峰, 赵玉合, 等. 古潜山油气藏研究综述[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 879-887. [LI J, LIU L F, ZHAO Y H, et al. A review of study on ancient buried hill reservoir[J]. Progress In Geophysics, 2006, 21(3): 879-887.]
- [4] 李军, 刘兴周, 高庆胜, 等. 大民屯凹陷前进潜山带储集层特征研究[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(1): 7-11. [LI J, LIU X Z, GAO Q S, et al. Study on reservoir characteristics of advanced buried hill belt in Damintun Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(1): 7-11.]
- [5] 李晓燕, 蒋有录, 陈涛. 古风化壳孔隙与裂缝发育特征及其油气地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 60-64. [LI X Y, JIANG Y L, CHEN T. Characteristics and petroleum geological significance of pore and fissures developed in the Paleo Weathered Crust[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(1): 60-64.]
- [6] 刘传虎. 潜山油气藏概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. [LIU C H. An Introduction to buried hill reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.]
- [7] 薛亮, 吴雨娟, 刘倩君, 等. 裂缝性油气藏数值模拟与自动历史拟合研究进展[J]. 石油科学通报, 2019, 4(4): 335-346. [XUE L, WU Y J, LIU Q J, et al. Advances in numerical simulation and automatic history matching of fractured reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(4): 335-346.]
- [8] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology, theory and methods[M]. W. H. Freeman and Co., 1980.
- [9] 印兴耀, 王慧欣, 曹丹平, 等. 利用三参数AVO近似方程的深层叠前地震反演[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 129-135. [YIN X Y, WANG H X, CAO D P, et al. Three term AVO approximation of Kf-fm- ρ and prestack seismic inversion for deep reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 129-135.]
- [10] MORADI S, INNANEN K A. Viscoelastic amplitude variation with offset equations with account taken of jumps in attenuation angle[J]. Geophysics, 2016, 81(3): 17-29.
- [11] 陈汉明, 汪焱林, 周辉. 一阶速度—压力常分数阶黏滞声波方程及其数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 302-310. [CHEN H M, WANG Y L, ZHOU H. A novel constant fractional-order Laplacians viscoacoustic wave equation and its numerical simulation method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 302-310.]
- [12] KJARTANSSON E. Constant-Q wave propagation and attenuation[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B9): 4737-4748.
- [13] 李传辉, 张繁昌, 印兴耀. 三种线性时频分析方法的影响因素及精度分析[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 239-242. [LI C H, ZHANG F C, YIN X Y. The influential factors and accuracy of three time-frequency analyses[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4): 239-242.]

(责任编辑 唐跟阳 编辑 付娟娟)