文章编号:1000 - 1441(2012)03 - 0219 - 06

基于地震波衰减的特征属性重构方法

魏 文,王兴谋,李红梅,王树刚,王 红
(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院,山东东营 257022)

摘要:以储层流体识别为目的,提出了基于地震波衰减的特征属性重构方法。首先从地震波衰减理论出发,通过改变地层品质因子表达式,推导了地震特征属性函数,利用振幅类、频率类及衰减属性重构新的地震属性;然后设计粘弹性介质模型进行试算,结果表明,利用特征属性函数重构的地震属性能较好地突出储层含流体变化特征,从而验证了基于地震波衰减的特征属性重构方法识别储层含油气性的有效性。将该方法应用于老河口油田北部老 168 井区河道砂岩储层油气识别,基于叠后地震资料精细刻画了储层流体的展布特征,取得了较好的应用效果。

关键词:地震波衰减;特征属性函数;老 168 井区;河道砂岩;油气识别
DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2012.03.002
中图分类号:P631.4 **文献标识码**:A

储层流体地震识别的依据是不同流体类型对地震波的传播和吸收影响不同。例如:当储层孔隙中含气时,地震波的速度会明显下降,吸收特征也会有比较明显的变化。浅层疏松砂岩储层含油之后,也表现出类似的地震响应特征。大多数情况下气层地震响应特征明显,可利用地震资料进行识别,而油层需要符合一定的地质条件,才具备地震识别的基础。

由于叠前地震资料具有丰富的振幅和旅行时信息,近年来对于储层流体的地震识别一般利用叠前 CRP 道集,通过流体置换、AVO 属性分析等方法进行。AVO 属性分析可以较好地解决储层流体识别问题,但是叠前地震道集需要进行高保真处理,资料品质直接影响 AVO 属性计算结果。在缺少实测横波资料时,横波速度的计算精度对 AVO 属性分析至关重要,而横波速度的精确计算往往比较困难。当叠前 AVO 属性分析的前提条件不能满足时,可以采用基于叠后地震资料的储层流体识别方法。

叠后地震属性分析是储层预测的重要技术。地震属性优化、多属性分析技术可以减少属性分析的多解性,较为有效地预测储层或者间接地预测储层含流体情况。杨占龙[1]等分析了地震属性分析技术应用的关键,解决了岩性油气藏的勘探难题;丁峰[2]等利用主成分分析技术和 RGBA(Red-Green-Blue-Alpha)颜色融合原理突出地质目标;谢东[3]等通过地震属性优化处理,优选出与研究目标关系最密切的属性来综合评价储层;王玉梅[4]等利用含气储层低速、低密度的特征,综合应用多种地震属性技术,较好地预测了有利含气储层分布。

地震瞬时属性是研究地下岩性分布及地层结构的有效工具,但是,由于对噪声比较敏感,瞬时属性的计算结果存在不确定性。近年来,随着计算方法的发展,瞬时属性的计算精度得到提高,抗噪能力得到加强,在实际应用中见到了很好的效果[5-6]。瞬时振幅和瞬时频率均能反映地层的岩性变化,有助于预测储层的分布形态,但无法识别储层含流体情况。

我们将对储层流体比较敏感的吸收衰减参数(如地层品质因子 Q 值)与瞬时属性联合起来识别储层流体变化,给出了地震特征属性重构方法。

1 方法原理

地震勘探中,用来表示地层吸收衰减性质的参数[7-10]有吸收系数(α)、衰减因子(h)、对数衰减率(δ)及品质因子(Q)等,其中对数衰减率 δ 表示地震波振幅(A)在一个波长(λ)距离上的衰减量或与之相应的一个周期(T)内的衰减量,即

$$\delta = \ln\frac{A_0}{A} = \alpha\lambda = \frac{\pi}{Q} \text{ 或 } \delta = \ln\frac{A_0}{A} = hT \quad (1)$$

式中:A_0 为地层吸收前地震波振幅;A 为地层吸收

收稿日期:2011 - 09 - 30;**改回日期**:2011 - 12 - 18。
作者简介:魏文(1980—),男,工程师,现主要从事天然气地震、地质综合研究工作。
基金项目:中国石油化工股份有限公司科技创新项目(P08004)和国家科技重大专项(2011ZX05006-002)联合资助。

后地震波振幅。大地吸收效应是一个时变的选频衰减低通滤波，满足

$$A(t)=A_0\mathrm{e}^{-\frac{\pi f}{Q}t} \tag{2}$$

式中：f 为频率。

吸收特征是储层含油气后比较明显的地震响应特征，为了能进一步突出、放大储层含油气后的吸收特征，取 $\widetilde{Q}=\frac{Q}{N}$（$N\geqslant 2$，为正整数），仿(2)式，令

$$\widetilde{A}(t)=A_0\mathrm{e}^{-\frac{\pi f}{\widetilde{Q}}t} \tag{3}$$

式中：$\widetilde{A}(t)$为放大储层含油气性质后的振幅。

将 $\widetilde{Q}=\frac{Q}{N}$代入(3)式，得

$$\widetilde{A}(t)=A_0\mathrm{e}^{-\frac{\pi f}{\frac{Q}{N}}t} \tag{4}$$

变形后，得

$$\widetilde{A}(t)=A_0\mathrm{e}^{-\frac{\pi f}{Q}t}\mathrm{e}^{-(N-1)\frac{\pi f}{Q}t} \tag{5}$$

将(2)式代入(5)式，得

$$\widetilde{A}(t)=A(t)\mathrm{e}^{-(N-1)\frac{\pi f}{Q}t} \tag{6}$$

分析(6)式可知，$\widetilde{A}(t)$为经过含油气储层多次吸收后的地震波振幅。在实际应用时，选择最佳 N 值，使重构函数计算的特征属性值能够最大程度地放大储层含油气后的吸收特征。

此外，还可以考虑利用衰减因子 h（即利用地震资料求取的吸收衰减类属性）替换地层 Q 值，结合(1)式，(6)式重构函数可以写为

$$\widetilde{A}(t)=A(t)\mathrm{e}^{-(N-1)\times fht^2} \tag{7}$$

令 $\widetilde{A}$ 为含油气储层的特征属性，F 为频率属性，A 为振幅属性，H 为储层含油气后的衰减属性，再令 t 为常数，则映射 R 如下：

$$\widetilde{A}=R(A,F,H) \tag{8}$$

由(8)式及其推导过程看出，重构的特征属性函数涉及储层的振幅类、频率类以及衰减类属性。从数学运算角度看，重构函数相当于对原有地震属性作一次或多次开方运算，可以突出各种属性的差异，很好地描述储层。从物理意义角度看，重构函数不仅含有能够反映储层岩性信息的数据项（振幅、频率属性），而且还包含储层流体信息的数据项（吸收衰减属性），是以地震波衰减公式为基础，通过改变地层品质因子，放大储层流体特征，从而达到识别储层流体的目的。相比于以往的地震属性优化、多属性分析等方法，上述特征属性函数重构方法不仅能达到识别储层流体特征的目的，而且具有明确的物理意义。

2 模型试算

设计一个三维粘弹性介质模型，模型网格为300×300×500，网格大小为 10 m×10 m。该模型纵方向(Z)500 个网格点分为 4 层，第 1 至第 3 层为 100 个网格点，第 4 层为 200 个网格点。第 3 层 Q 值在 XY 平面有变化，以平面中心点为圆心，50 个网格点为半径，圆内和圆外的 Q 值不同。表 1为粘弹性介质模型参数，图 1 为模型网格点 X=150 处的 YZ 剖面。在模型表面每个网格点上自激自收，时间间隔为 1 ms，震源为固相纵波源，主频 25 Hz。应用三维交错网格高阶有限差分法[11-14]模拟正演地震记录，差分精度为 $O(\Delta t^2,\Delta x^{10})$，正演时间为2 500 ms。在地震记录模拟计算时，加入信噪比为 20 的噪声。图 2 是模型在 X=150处 YZ 方向的模拟地震记录，地震记录上时间 2 157 ms 处对应于模型 Z 方向 3 000 m 界面的反射。

表 1 粘弹性介质模型参数

层数	v_p/(m·s^{-1})	v_s/(m·s^{-1})	ρ/(kg·m^{-3})	Q
第 1 层	2 000	1 156	2 000	1 000
第 2 层	3 000	1 734	2 200	2 000
第 3 层	4 000	2 312	2 300	圆内1 800 圆外3 000
第 4 层	5 000	2 890	2 500	4 000

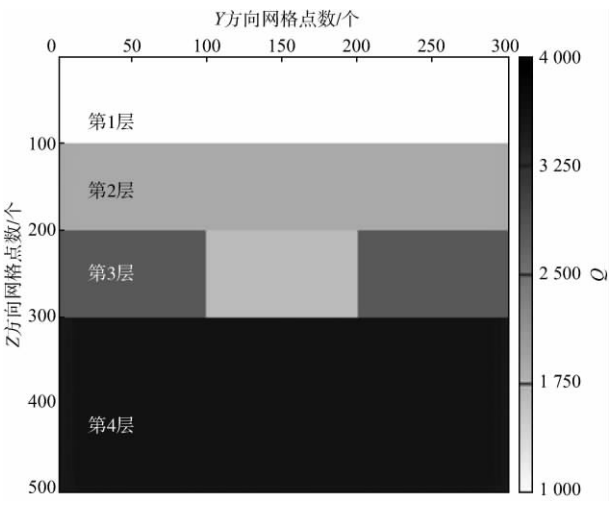


图 1 模型网格点 X=150 处 YZ 方向剖面

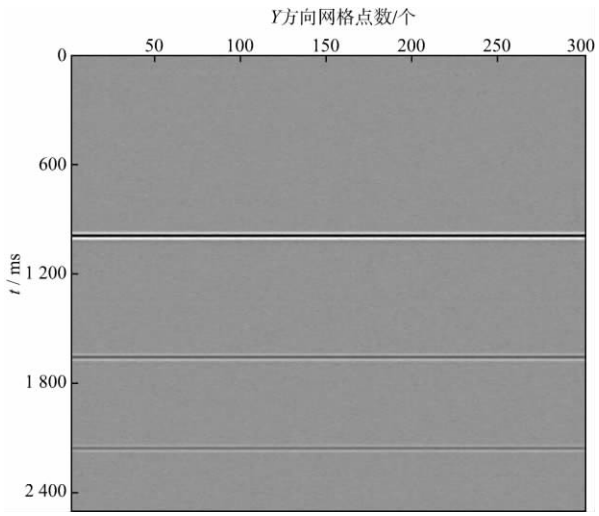


图 2　模型网格点 $X=150$ 处 YZ 方向地震记录

图 3 是由 YZ 方向地震记录计算得到的瞬时振幅和瞬时频率。图 4 为 2 157 ms 处瞬时振幅和瞬时频率时间切片，可见 Q 值的变化没有引起瞬时振幅和瞬时频率属性的变化。

利用(6)式对瞬时振幅、瞬时频率和地层 Q 值进行属性重构，得到新的地震属性，并对新的地震属性在 2 157 ms 处进行切片分析，结果如图 5 所示。可以看出，重构的地震属性清晰地反映出模型中第 3 层圆内和圆外 Q 值的不同，进一步突出了储层的含流体变化特征。

上述模型试算结果表明，由特征属性重构方法得到的新地震属性能够较好地反映出储层含流体之后的变化特征，用于储层流体的地震识别具有一定的优势。

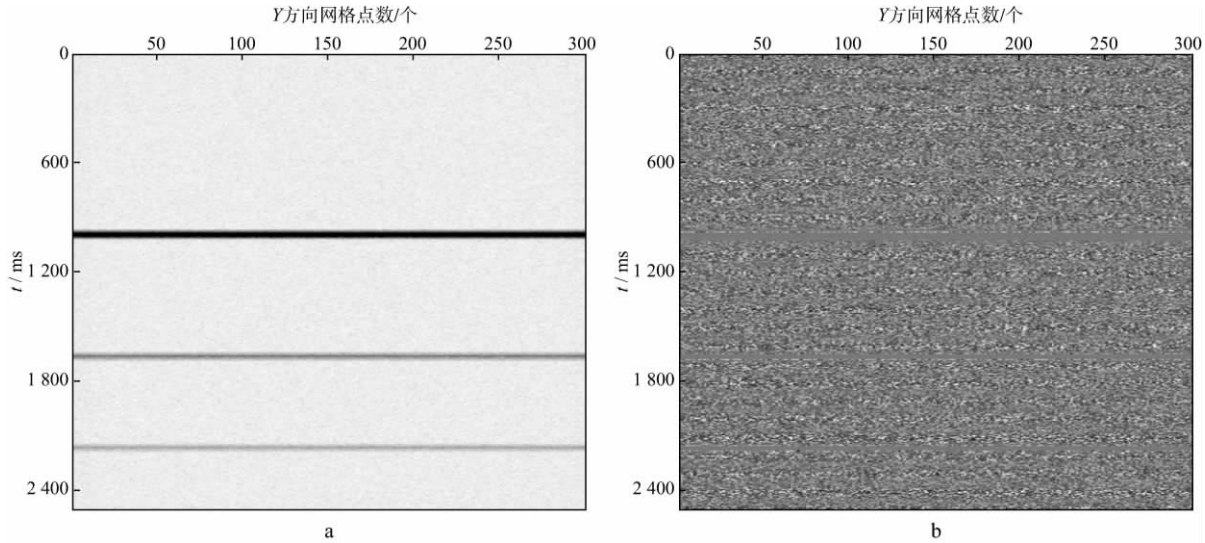


图 3　模型网格点 $X=150$ 处 YZ 方向瞬时振幅(a)和瞬时频率(b)剖面

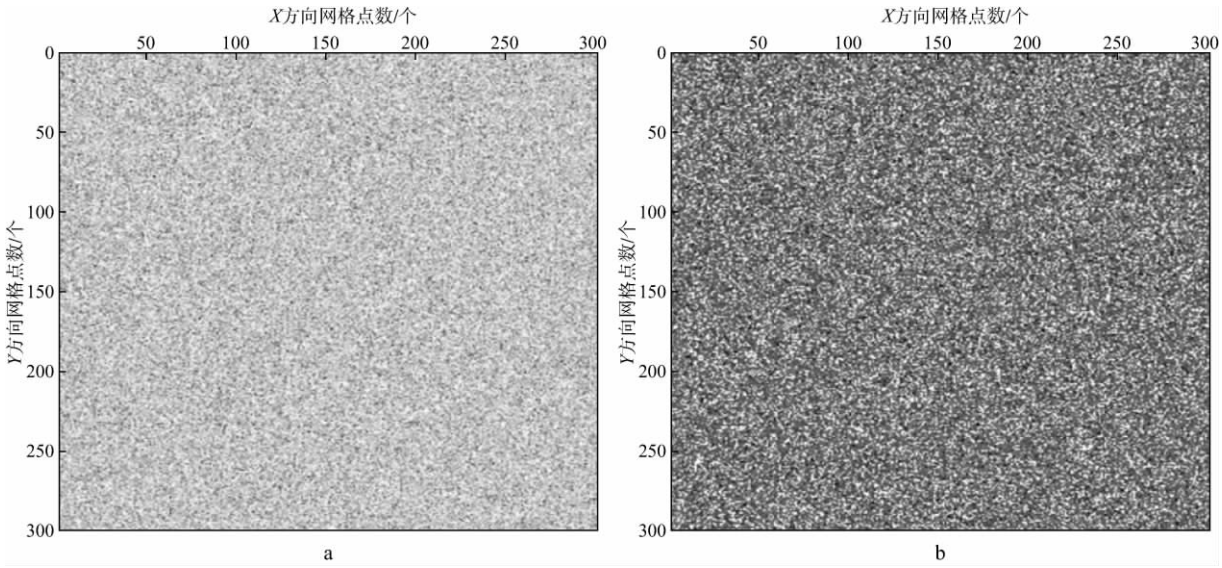


图 4　瞬时振幅(a)、瞬时频率(b)2 157 ms 时间切片

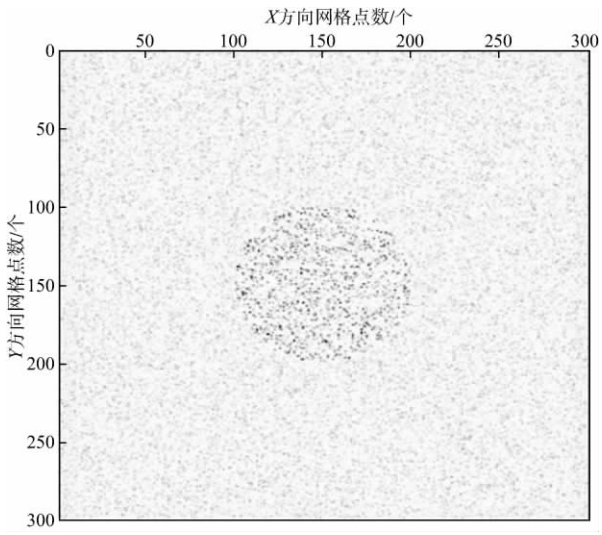


图 5 重构属性 2 157 ms 时间切片

3 应用实例

老 168 井区位于老河口油田[15-17]北部，构造上属于济阳坳陷埕北凹陷东南斜坡带，馆陶组上段为河流相岩性油气藏。2004 年，老 168 井—老 163 井区上报控制储量 2 600×10⁴ t；2007 年，老 163 井区上报探明储量 673×10⁴ t，核销控制储量 589×10⁴ t。该区开发前需要在河流相砂体精细描述基础上明确砂体含油气特征及含油气边界。

利用测井资料对该区储层、油气层、围岩的岩石物理特征进行分析，并制作正演模型，明确老 168 井区储层含油气后的地震属性特征（强振幅、低频、强吸收）。在储层描述基础上，利用地震属性对各砂组的含油气性进行了判识（图 6 至图 8），结果表明，馆陶组 2 砂组振幅属性在宏观上反映了河道砂体的分布情况，频率属性对河道砂体含油气性有一定的反映，而吸收衰减属性对于砂体含油气性的刻画相对较好。与钻探情况进行对比分析表明，上述 3 种地震属性对储层的油气性识别均存在多解性。例如：在频率属性图上，老 171 井区存在大面积的低频区（图 7 中椭圆所示区域），且河道形态不明显；在地震振幅及吸收衰减属性图上，该区西北部（图 6，图 8 中椭圆所示区域）振幅强、吸收异常明显，但是位于该区域的埕 86 井储层主要含水。

为了减少多解性，更好地放大河道砂体含流体特征，利用本文方法进行特征属性重构分析。图 9 是利用地震振幅、频率以及吸收衰减属性重构的特征属性，红色区域为有利含油气区域。预测结果与钻探情况吻合较好，客观地反映了河道砂体含流体

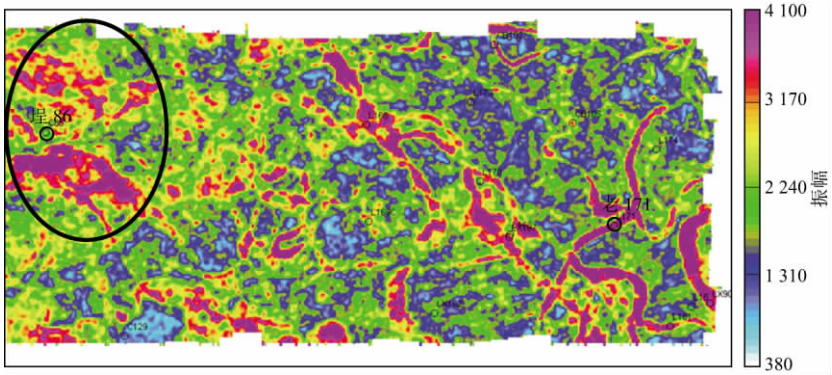


图 6 老 168 井区馆陶组 2 砂组均方根振幅属性

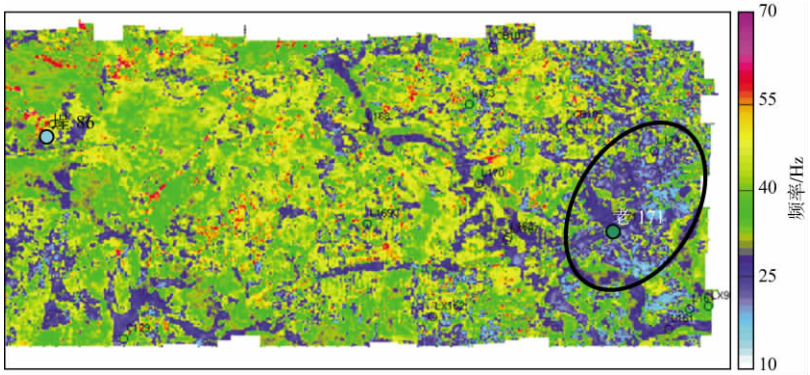


图 7 老 168 井区馆陶组 2 砂组瞬时频率属性

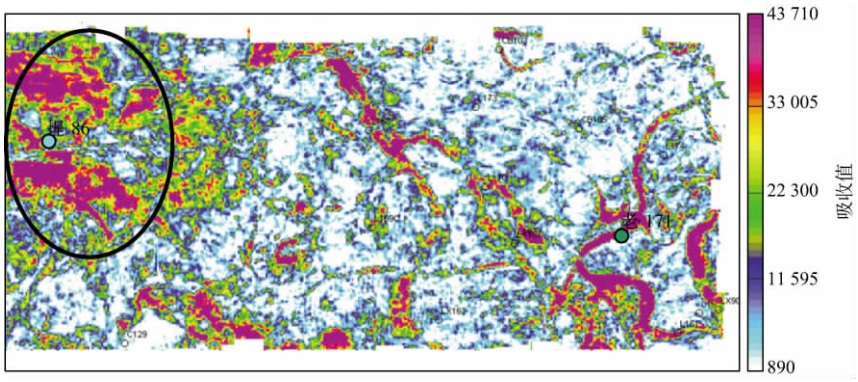


图 8　老 168 井区馆陶组 2 砂组吸收衰减属性

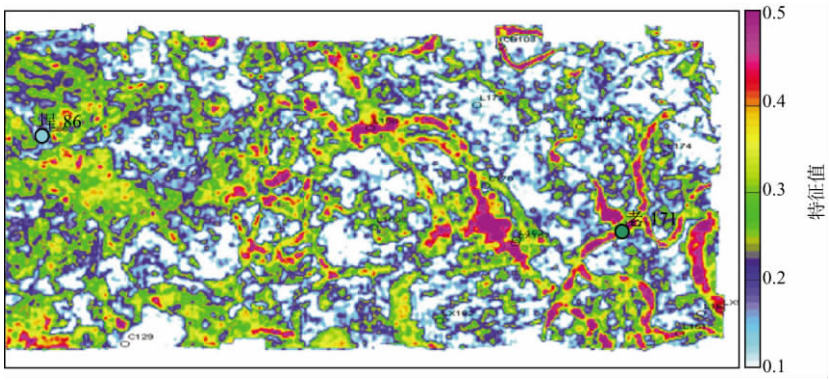


图 9　老 168 井区馆陶组 2 砂组特征重构属性

情况，其中埕 86 井区所在的西北部非含油气信息得到了较好的压制，老 171 井区河道细节刻画更加清晰，较好地反映了储层的含油气情况。目前，老 171井尚未上钻，而根据特征属性预测结果，老 171井所在位置储层发育且含油气性较好，由此坚定了上钻该井的信心。在老 168 井区，利用重构的特征属性进行各砂组含流体检测，累计预测含油气面积 63.52 km^2，储量6 352×10^4 t。

4　结束语

储层中流体的存在对地震属性(振幅、频率、吸收值等)会产生一定的影响，重构特征属性与振幅、频率、吸收值密切相关，它是实现储层流体识别的有益尝试。

精确求取与储层流体相关的地震吸收属性是特征属性重构的关键。目前，地震吸收属性的计算多数基于叠后地震资料，计算精度有限并存在一定的多解性，进而影响特征属性重构方法的应用效果。为了提高特征属性重构方法识别储层流体的效果，需要进一步深入研究储层流体变化对地震吸收属性的影响，提高地震吸收属性求取精度。

参　考　文　献

[1] 杨占龙，彭立才，陈启林，等. 地震属性分析与岩性油气藏勘探[J]. 石油物探，2007，46(2)：131-136
Yang Z L，Peng L C，Chen Q L，et al. Seismic attributes analysis and lithological reservoir exploration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2007，46(2)：131-136

[2] 丁峰，年永吉，王治国，等. 地震多属性 RGBA 颜色融合技术的应用研究[J]. 石油物探，2010，49(3)：248-252
Ding F，Nian Y J，Wang Z G，et al. Application of seismic multi-attributes RGBA color blending[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2010，49(3)：248-252

[3] 谢东，王永刚，乐友喜，等. 地震属性分析技术在子寅油田开发中的应用[J]. 石油物探，2003，42(1)：72-76
Xie D，Wang Y G，Yue Y X，et al. Application of seismic attribute analysis technology in the production of Ziyin Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2003，42(1)：72-76

[4] 王玉梅，季玉新，李东波，等. 应用地震属性技术预测 A 地区储层[J]. 石油物探，2001，40(4)：69-76
Wang Y M，Ji Y X，Li D B，et al. Prediction of reservoirs in A region with seismic attribute technique [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2001，

40(4):69-76

[5] 高静怀,陈凤,陈树民.利用地震瞬时谱属性进行薄互层分析[J].煤田地质与勘探,2005,33(3):67-70
Gao J H,Chen F,Chen S M. Using seismic instantaneous attributes to analyze thin interbeds[J]. 2005,33(3):67-70

[6] 高静怀,汪文秉,朱光明.小波变换与信号瞬时特征分析[J].地球物理学报,1997,40(6):821-832
Gao J H,Wang W B,Zhu G M. Wavelet transform and instantaneous attributes analysis[J]. Chinese Journal Geophysics,1997,40(6):821-832

[7] 凌云.大地吸收衰减分析[J].石油地球物理勘探,2001,36(1):1-8
Ling Y. Analysis of attenuation by earth absorption[J]. Oil Geophysical Prospecting,2001,36(1):1-8

[8] 马昭军,刘洋.地震波衰减反演研究综述[J].地球物理学进展,2005,20(4):1074-1082
Ma Z J,Liu Y. A summary of research on seismic attenuation[J]. Progress in Geophysics,2005,20(4):1074-1082

[9] 辛可锋,李振春,王永刚,等.地层等效吸收系数反演[J].石油物探,2001,40(4):14-20
Xin K F,Li Z C,Wang Y G,et al. Formation equivalent absorption coefficient inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2001,40(4):14-20

[10] 苑书金,董宁,于常青.地震波衰减技术在鄂尔多斯盆地储层预测中的应用[J].石油物探,2006,45(2):182-185
Yuan S J,Dong N,Yu C Q. The application of seismic attenuation technology for reservoir prediction in Erdos basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2006,45(2):182-185

[11] 裴正林.三维各向异性介质中弹性波动方程交错网格高阶有限差分法数值模拟[J].石油大学学报,2004,28(5):23-29
Pei Z L. Three-dimensional numerical simulation of elastic wave propagation in 3-D anisotropic media with staggered-grid high-order difference method[J]. Journal of the University of Petroleum,2004,28(5):23-29

[12] 陈可洋.标量声波波动方程高阶交错网格有限差分法[J].中国海上油气,2009,21(4):232-236
Chen K Y. High-order staggered-grid finite difference scheme for scalar acoustic wave equation[J]. China Offshore Oil and Gas,2009,21(4):232-236

[13] 李振春,张华,刘庆敏,等.弹性波交错网格高阶有限差分法波场分离数值模拟[J].石油地球物理勘探,2007,42(5):510-515
Li Z C,Zhang H,Liu Q M,et al. Numeric simulation of elastic wavefield separation by staggering grid high-order finite-difference algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting,2007,42(5):510-515

[14] 王秀明,张海澜,王东.利用高阶交错网格有限差分法模拟地震波在非均匀孔隙介质中的传播[J].地球物理学报,2003,46(6):842-849
Wang X M,Zhang H L,Wang D. Modelling of seismic wave propagation in heterogeneous poroelastic-media using a high-order staggered finite-difference method[J]. Chinese Journal of Geophysics,2003,46(6):842-849

[15] 魏红梅,董臣强,张明振.斜坡带曲流河道砂体成藏模式及描述方法——以老河口油田为例[J].石油地球物理勘探,2003,38(2):173-177
Wei H M,Dong C Q,Zhang M Z. Meander channel sandstone reservoir pattern on slope belt and its description method:taking Laohekou oilfield for example[J]. Oil Geophysical Prospecting,2003,38(2):173-177

[16] 庄丽.老河口油田油藏特征及适用的勘探技术[J].海洋石油,2005,25(3):14-17
Zhuang L. Oil-reservoir forming features and exploration technology in Laohekou oil field[J]. Offshore Oil,2005,25(3):14-17

[17] 谭茂金,杨邦伟,贾黎,等.胜利老河口油田桩106井区馆陶组成藏规律研究[J].石油与天然气地质,2006,27(1):44-47
Tan M J,Yang B W,Jia L,et al. A study of reservoiring pattern of Guantao Fm in Zhuang 106 well block in Laohekou oilfield[J]. Oil & Gas Geology,2006,27(1):44-47

(编辑:戴春秋)