

引用格式: 刘海宁, 韩宏伟, 操应长, 等. 致密碎屑岩气藏地震频变特征主控因素定量分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 72-80
Liu Haining, Han Hong-wei, Cao Yingchang, et al. Main controlling factors quantitative analysis of seismic frequency-varying characteristics of tight elastic gas reservoirs[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 72-80

石油、天然气工业

致密碎屑岩气藏地震频变特征 主控因素定量分析

刘海宁^{1,2} 韩宏伟² 操应长^{1*} 李红梅² 魏文²

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院¹, 青岛 266580; 中国石化胜利油田分公司物探研究院², 东营 257022)

摘要 利用地震频变属性进行深层致密碎屑岩气藏含气性检测是重要攻关方向,但是影响地震频变特征的因素有很多,有必要对控制因素进行定量分析。以东营凹陷民丰地区实际地质情况为约束,利用地震正演模拟技术,对影响致密碎屑岩气藏频变特征的埋深、岩性、储层厚度等因素进行了定量分析,并且利用实际地震资料对地震频率变化率和日产气量进行了对比分析。分析表明:对于埋深较大的深层致密碎屑岩气藏,埋深、地层韵律性、岩性等因素对地震频变特征影响较小,储层厚度和含气性是影响地震频变特征的主要因素,地震频率变化率与日产气量具有较好的相关性。针对某一具体目的层,储层厚度在一定范围内变化时,可以使用地震频变特征预测储层含气性。

关键词 东营凹陷 频变属性 控制因素 致密储层 含气检测

中图分类号 TE122; 文献标志码 B

对于碎屑岩气藏地震预测,前人已进行了大量攻关研究,形成了较为成熟的基于振幅信息应用的地震预测技术序列^[1-4],取得了较好的预测效果,但是随着勘探深度的增大、勘探目标的复杂化和隐蔽性,深层裂解气藏具有储层物性差、孔隙结构复杂、非均质性强、流体分布规律差等特点^[5],并且其与围岩之间波阻抗差异小,振幅信息的应用存在局限性。在地震信息应用过程中,时间域和频率域构成了地震信号的两种表示方式,在不同域内其信号特征不同,地震频率信息同样包含着储层和流体信息,不同尺度的储层及储层含流体的变化会对频率产生影响,且频率的衰减对于岩石物理状态变化的反应比速度更为灵敏,携带了比速度更多的反映岩石物理性质的信息^[6,7]。针对深层致密碎屑岩气藏勘探存在的问题,有必要转变思路,从地震频率信息角度

进行地震预测技术研究^[8,9]。地震波经过含气储层后会表现出吸收衰减、速度发散等异常现象,在有效频带内地震频率能量的变化称为地震频变。含气层与非含气层的地震频变特征具有明显差异,但是引起地震波衰减的因素有很多^[10],在应用频变特征预测碎屑岩气藏含气性时,如何排除其他因素的影响是关键,分析认为有必要对影响碎屑岩气藏频变特征的主控因素进行定量分析,为利用该特征预测致密碎屑岩气藏奠定基础。民丰地区位于东营凹陷北部陡坡带,其沙四段下亚段发育近岸水下扇沉积,为砂砾岩体致密砂岩气藏^[11,12]。以东营凹陷民丰地区实际地质情况为约束,主要利用时频谱分析、地震正演模拟分析等技术,对影响致密碎屑岩气藏频变特征的埋深、岩性、储层厚度等主控因素进行定量分析。

1 地震频变特征影响因素

影响地震频变特征的因素从广义上来说可以分为两类,一类是与地震波传播特性有关的衰减,如球面扩散等;另一类是反映内在属性的地层吸收衰减,它反映了地层的岩性、含流体类型、流体饱和度、压力等信息^[13,14]。胶结性差的地层对能量的吸收比致密岩石地层强得多^[15]。与地震波传播特性有关的主要涉及传播距离,即地层的埋深,随着埋深增大,

2018年10月12日收到 国家油气科技重大专项
(2016ZX05006002)和

中国石化胜利油田分公司科技攻关项目(YKW1705)资助
第一作者简介: 刘海宁(1986—),男,山东广饶人,博士研究生,助理
研究员。研究方向: 油气勘探。E-mail: liuhaining632_slyt@
sinopec.com。

* 通信作者简介: 操应长(1969—),男,安徽潜山人,教授,博士研究
生导师。研究方向: 沉积学、层序地层学及储层地质学。E-mail: ca-
oych@upc.edu.cn。

地震波传播距离增大,地震波发生球面扩散,同时穿过地层,存在吸收衰减,地震波振幅减弱,频率降低^[16]。反映内在属性的地层本身对地震波的吸收衰减,从微观机理方面包含岩石骨架颗粒及岩石裂隙间相对滑动能量损失,孔隙流体与骨架间的摩擦作用,热弹性效应及骨架本身的非弹性引起的能量衰减^[6]。从宏观影响因素方面表现为地层岩性、厚度、含气性、韵律性等。不同岩性储层速度不同、孔隙结构不同,吸收衰减不同。储层中含有流体时,一方面流体会吸附在孔隙壁,降低储层模量使衰减增大,另一方面流体在孔隙中的内摩擦也会使地层吸收衰减增大^[17]。储层厚度及地层韵律性对地震频率的影响,常表现为储层厚度较大时,地震频率较低,在砂泥薄互层中,地震频率较高^[18,19]。主要从宏观角度入手,讨论了埋深、储层(厚度、岩性、含气性)、地层韵律性等因素对地震频变特征的影响。

2 地震频变特征控制因素定量分析

2.1 埋深对地震频变特征的影响

随着时间增大(地震资料中的时间与埋深有对

应关系),地震频谱特征(频宽、峰值频率等)发生明显变化。分析过丰深1井地震道时频谱特征[图1(a)]在浅层时间 t (地震旅行时)为600~1200ms时,与600~1500m埋深基本对应,地震频带较宽,能达到60~70Hz,峰值频率 F 较大,能达到30~50Hz;在深层时间 t 为3000~4000ms时,与3500~5000m埋深基本对应,地震频带相对变窄,只有40Hz左右,峰值频率 F 相对减小,分布在15~25Hz。在时频谱上拾取不同时间点对应的峰值频率,得到峰值频率随时间变化的曲线[图1(b)],可以看出,随着时间增大,峰值频率逐渐向低频端移动。在单位时间内,埋深较小时,峰值频率减小幅度较大,埋深较大时,峰值频率减小幅度较小。同时,对过坨深4、丰深3等其他6口井的过井地震道时频谱特征进行了分析,同样符合该变化规律[图1(b)]。通过对上述7口井过井地震道峰值频率随时间变化的特征进行分析,认为随着埋深增大,峰值频率与时间的变化符合指数关系:

$$F = ae^{bt} \quad (1)$$

式(1)中: F 为峰值频率,Hz; t 为时间(地震旅行时),ms; a 、 b 为常数(不同地震道取值不一样)。

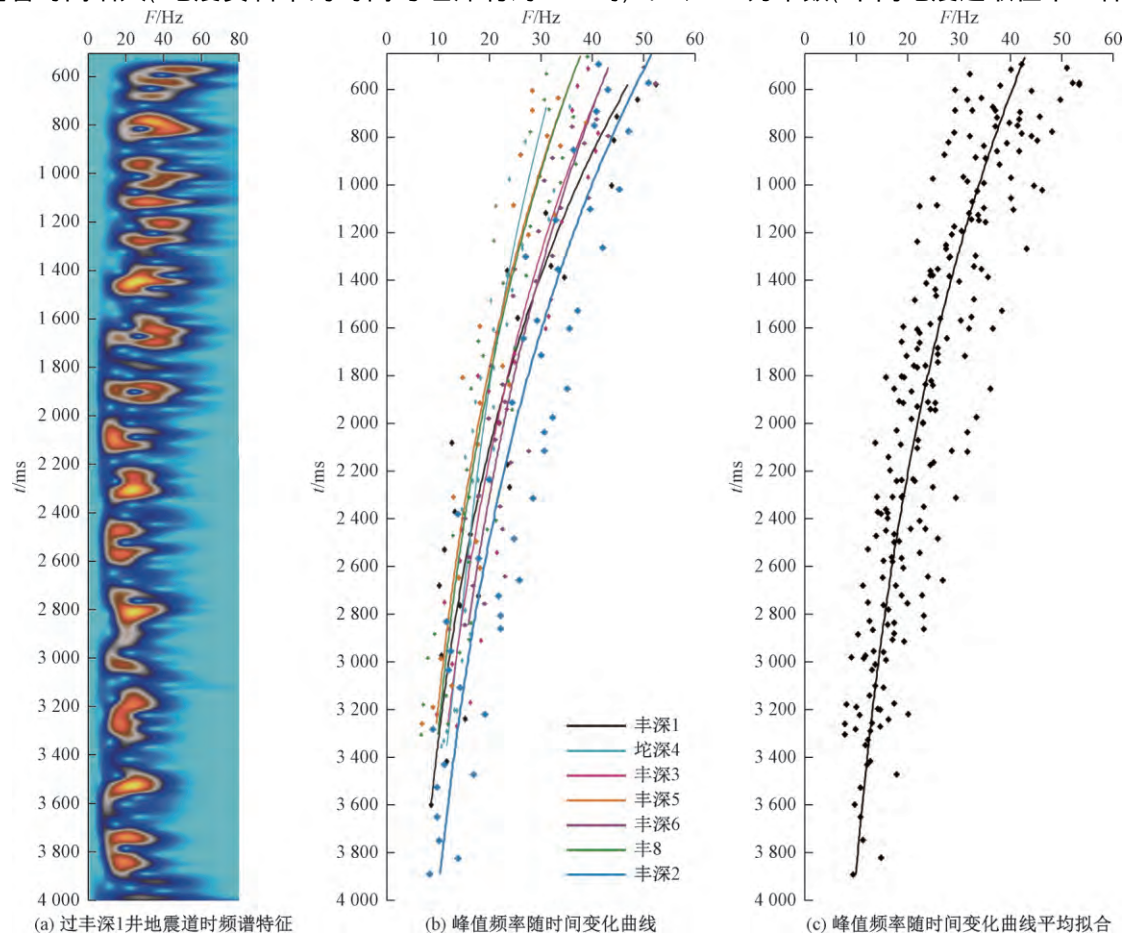


图1 过丰深1井地震道时频谱及民丰地区峰值频率随时间变化曲线

Fig. 1 The seismic time-frequency spectrum crossing Fengshen1 well and time-frequency curves of the peak frequency in Minfeng area

为了便于量化分析峰值频率随着埋深增大而减小的速率,对研究区过这 7 口井的地震道峰值频率随时间变化曲线进行了公式拟合,得到各道峰值频率与时间的关系式。例如:过丰深 1 井地震道: $F = 64.961e^{-0.0006t}$; 过丰深 2 井: $F = 63.817e^{-0.0005t}$; 过丰深 3 井: $F = 54.908e^{-0.0005t}$; 过坨深 4 井: $F = 39.672e^{-0.0004t}$; 过丰深 5 井: $F = 47.147e^{-0.0005t}$; 过丰深 6 井: $F = 53.568e^{-0.0004t}$; 过丰 8 井: $F = 46.737e^{-0.0005t}$ 。同时,为了消除随机误差的影响,将多道峰值频率随时间变化曲线进行平均拟合[图 1(c)],得到研究区峰值频率随时间变化曲线,并对此曲线进行公式拟合,得到了递减函数: $F = 51.654e^{-0.0005t}$, $R^2 = 0.7762$ 。对上述递减函数求导数,即可定量分析峰值频率变化量与时间变化量之间的关系,求导后可得到: $F' = -0.0258e^{-0.0005t}$ 。在民丰地区,通过时深转换,大于等于 3 000 ms 的时间可以代表深层致密砂砾岩体储层的深度,因此,以 3 000 ms 为临界值分析该地区致密砂砾岩体的峰值频率变化特征。根据求导后的关系式,当时间为 3 000 ms 时, $F' = -0.0258e^{-0.0005 \times 3000} = -0.00576$,即当时间为 3 000 ms 时,时间每增加 100 ms(埋深增加 150 m),峰值频率 F 相应地减小量约为 0.5 Hz。因此,针对民丰洼陷沙四段下亚段砂砾岩体,埋深非常大,在一定埋深范围内变化时,埋深引起的地震峰值频率变化较小。

2.2 储层对地震频变特征的影响

2.2.1 储层厚度

储层厚度与地震频率之间具有非常密切的关系,为了讨论在不同储层厚度情况下的地震频变特征,建立了楔形地质模型[图 2(a)],模型参数具体为:楔形储层纵波速度为 4 400 m/s, Q (地震波衰减品质因子)值为 100;围岩速度为 4 200 m/s, Q 为 200;模拟信号:Ricker 子波 60 Hz。通过地震波场正演模拟,并提取其地震频率属性[图 2(b)],分析了储层的厚度变化与地震频率之间的关系。

从地震频率属性剖面可看出,穿过不同厚度储层,地震频率特征有差异,随着储层厚度增大,储层底面主频表现为先减小后增大再减小,最后逐渐稳定。为了量化分析其变化特征,从频率属性剖面上,分别读取了储层底面不同位置每一道的主频值,不同地震道对应不同储层厚度,然后将主频值与相应道数做交汇[图 2(d)红色点]。从关系曲线上看,储层厚度在 0.375λ (λ 为地震子波波长)范围内变化时引起的地震频率变化最大,变化量约为 9 Hz,该厚度处对应的道号为 95,储层厚度为 27.5 m。按照单位厚度范围内地震频率变化量推算,当 $0 < \text{储层厚度} < 0.375\lambda$ 时,储层厚度每增加 20% 时,引起约 1.8 Hz 的峰值频率减小量。因此,储层厚度引起的峰值频率变化量较大,使用频变属性进行含气性检测时,应注意储层厚度变化。

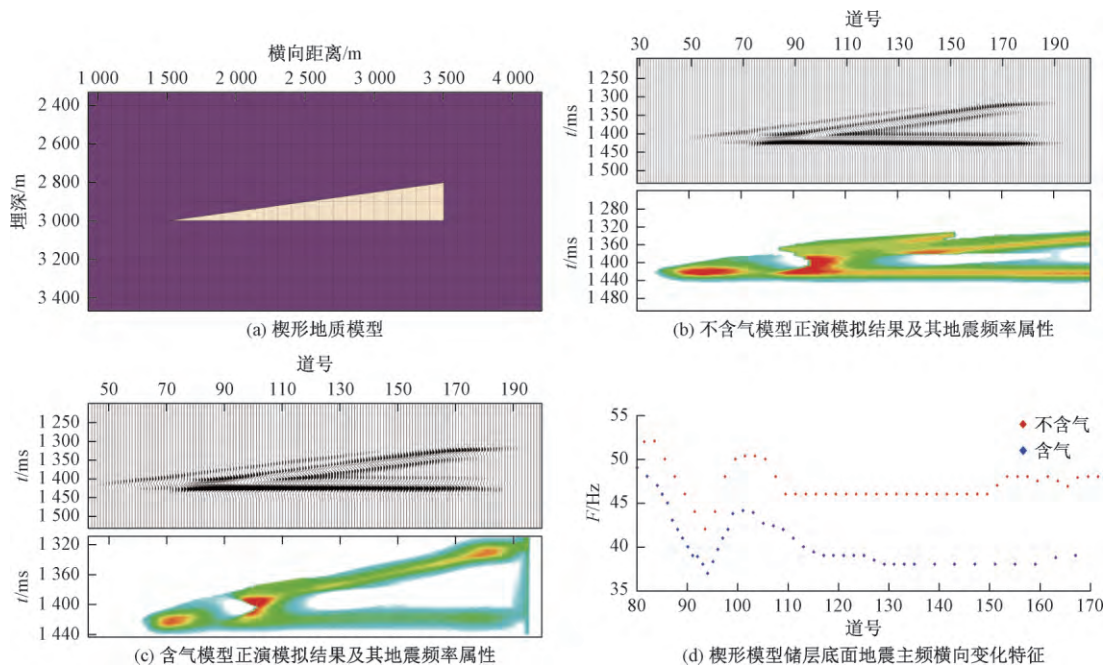


图 2 楔形模型正演及其地震频率变化特征

Fig. 2 The forward modeling of wedge model and characteristics of seismic frequency variation

2.2.2 储层含气性

在利用楔形模型 [图 2(a)] 讨论储层厚度对频变特征影响基础上,进一步修改模型参数(储层速度为 4 000 m/s, $Q=10$, 围岩速度为 4 200 m/s, $Q=200$),使储层含气,通过对比模型含气与不含气时地震频率响应的差异性,分析了储层含气性对地震频变特征的影响。

对上述楔形模型进行了地震波场正演模拟,结果如图 2(c),并提取其地震频率属性,从地震频率剖面上可以看出,在储层不同厚度的地方,地震频率响应特征存在差异,另外在相同储层厚度位置,储层含气与不含气时 [图 2(c) 与图 2(b) 比较] 地震频率响应特征也同样存在差异。

利用地震频率属性拾取了楔形模型底面峰值频率值,建立了不同厚度含气储层频率特征曲线 [图 2(d) 蓝色点],可以看出,储层含气后,同样是在储层厚度小于 0.375λ (道号为 95, 储层厚度为 27.5 m) 范围内变化时引起的地震峰值频率变化量最大。随着厚度增大,峰值频率不断减小,总减小量约为 12 Hz。相同厚度位置,含气储层与不含气储层相比,含气性引起的地震峰值频率减小非常明显,约为 3 Hz。前已述及,当储层厚度在 $0 \sim 0.375\lambda$ 范围内变化时,储层厚度每增加 20% 时,引起约 1.8 Hz 的峰值频率减小量,小于储层含气引起的地震峰值频率变化。因此,当储层厚度在该范围内变化时,可以使用地震频变属性进行含气检测。

在上述分析基础上,进一步建立了层状地质模型(图 3) 分析了含气饱和度对地震频变特征的影响。

图 3 中两个模型的参数如下:气藏的速度 ($V_{气}$) 为 4 500 m/s, 密度 ($\rho_{气}$) 为 2.5 g/m^3 , 围岩的速度为 ($V_{泥}$) 4 000 m/s, 密度 ($\rho_{泥}$) 为 2 g/m^3 。两个模型参数主要差异在 Q , 上部模型中储层 $Q=10$, 下部模型中储层 $Q=5$, 令其代表含气饱和度不同的两套储层。对图 3 中不同含气饱和度地质模型进行地震波场正演模拟,并提取相应的地震频率属性,从地震频率属性上看,两个地震记录顶部的地震频率均相同,当地震波经过含气饱和度不同的气层后,底部的地震频率出现不同的变化,其中 $Q=10$ 的含气层底部地震频率特征表现为橙色向黄色过渡,而 $Q=5$ 的含气层底部地震频率特征表现为黄色。对目的层的顶、底分别进行频谱特征分析,两个模型的地震记录顶部地震频谱特征相同,地震峰值频率为 19 Hz,而两个模型的底部地震频谱特征发生比较明显的变化, $Q=10$ 的含气层底部地震峰值频率为 17 Hz,减小量为 2 Hz, $Q=5$ 的含气层底部地震峰值频率为 15 Hz,减小量为 4 Hz,峰值频率变化更加明显,含气饱和度越大区域,频变异常将越明显。

2.2.3 储层岩性

为了讨论岩性变化对地震频率的影响,建立了如图 4 的不同岩性地质模型,模型参数:①砾岩速度 ($V_{砾}$) 为 5 000 m/s, 砾岩密度 ($\rho_{砾}$) 为 2.6 g/cm^3 , $Q=240$; ②砂砾岩速度 ($V_{砂砾}$) 为 4 800 m/s, 砂砾岩密度 ($\rho_{砂砾}$) 为 2.55 g/cm^3 , $Q=230$; ③砂岩速度 ($V_{砂}$) 为 4 500 m/s, 砂岩密度 ($\rho_{砂}$) 为 2.5 g/cm^3 , $Q=220$; ④围岩速度 ($V_{泥}$) 为 4 000 m/s, 围岩密度

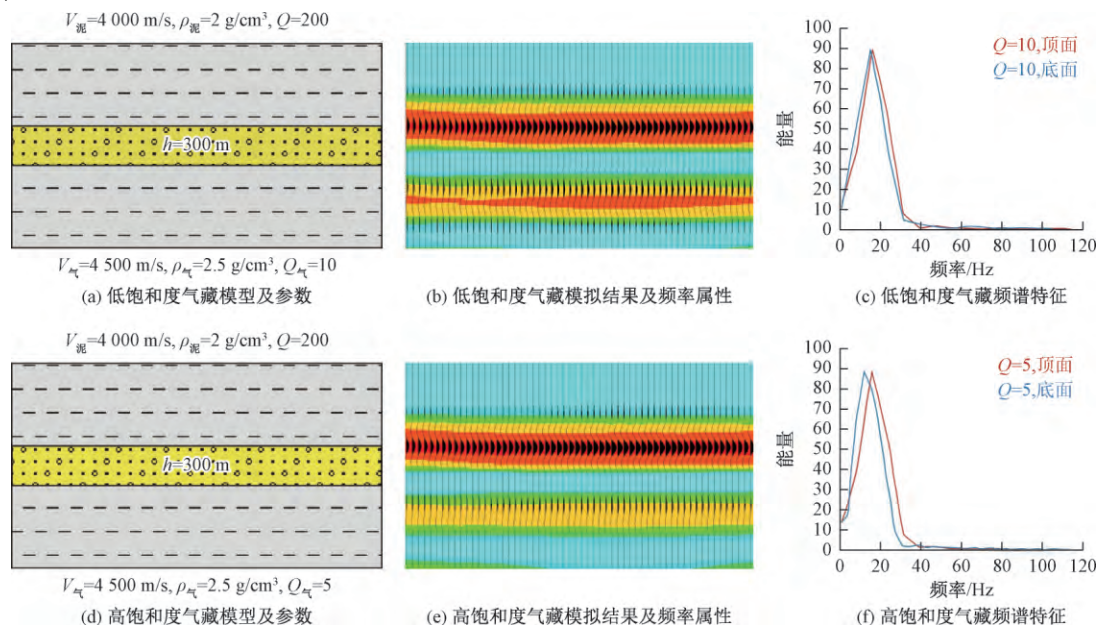


图 3 不同含气饱和度模型正演模拟及地震频率特征

Fig. 3 Forward modeling and seismic frequency characteristics of different gas saturation models

($\rho_{泥}$) 为 2 g/cm^3 , $Q=200$ 。

对图 4 不同岩性地质模型进行地震波场正演模拟,并提取相应的地震频率属性,从地震频率属性上看,各个地震记录顶部的地震频率峰值均相同,当地震波经过目的层后,底部的地震频率也基本不变(均为橙色特征值)。进而对目的层的顶、底分别进行频谱特征分析,各个模型的地震记录顶部地震频谱特征相同,峰值频率均在 17 Hz 左右,而底部地震频谱特征也基本没有发生变化,峰值频率均在 17 Hz 左右。分析认为,由于致密碎屑岩储层岩性致密,使得地震波经过此类储层后,发生非常微弱的衰减特征,地震频率特征基本不发生变化,因此,致密碎屑岩储层岩性的变化对地震频率的影响很小。

2.3 地层韵律性对地震频变特征的影响

对于砾岩体来讲,一般为事件性沉积,具有沉积速率快、厚度大、岩性差异不明显、横向分布不稳定、内部结构复杂等特点,在垂向上表现为自下而上砾岩层数减少、厚度减薄,泥岩层数增多、厚度增大的正旋回叠置特征。为了方便研究,将复杂问题简单化,建立单个层状不含气与含气韵律模型[图 5(a)],讨论韵律地层含气之后的地震频率特征。不

含气韵律模型参数:韵律地层自下而上速度参数分别为 $4\ 500$ 、 $4\ 100$ 、 $4\ 400$ 、 $4\ 000 \text{ m/s}$, Q 均为 100 ;上覆围岩速度为 $4\ 200 \text{ m/s}$, Q 为 200 ;下伏围岩速度为 $4\ 600 \text{ m/s}$, Q 为 200 。含气韵律模型参数:韵律地层自下而上速度参数分别为 $4\ 500$ 、 $4\ 100$ 、 $4\ 400$ 、 $4\ 000 \text{ m/s}$, Q 分别为 100 、 10 、 100 、 5 ;上覆围岩速度为 $4\ 200 \text{ m/s}$, Q 为 200 ;下伏围岩速度为 $4\ 600 \text{ m/s}$, Q 为 200 。

对上述两个韵律模型进行地震正演模拟,得到相应的正演模拟记录[图 5(b)、图 5(d)]。对地震模拟记录进行时频分析,不含气韵律地层的时频谱在目的层段地震峰值频率基本不变,含气韵律地层的时频谱在目的层段地震峰值频率在纵向上自上而下逐渐减小,呈现一定的斜率变化特征[图 5(c)、图 5(e)]。通过正演分析可知,地层韵律性对地震频率变化影响小于含气性的影响,在利用地震频变特征进行含气性检测时,可不考虑地层韵律性影响。

3 地震频变特征控制因素对比及实例分析

3.1 各因素对地震频变特征的控制作用对比

在上述定量分析基础上,对地层埋深、储层厚

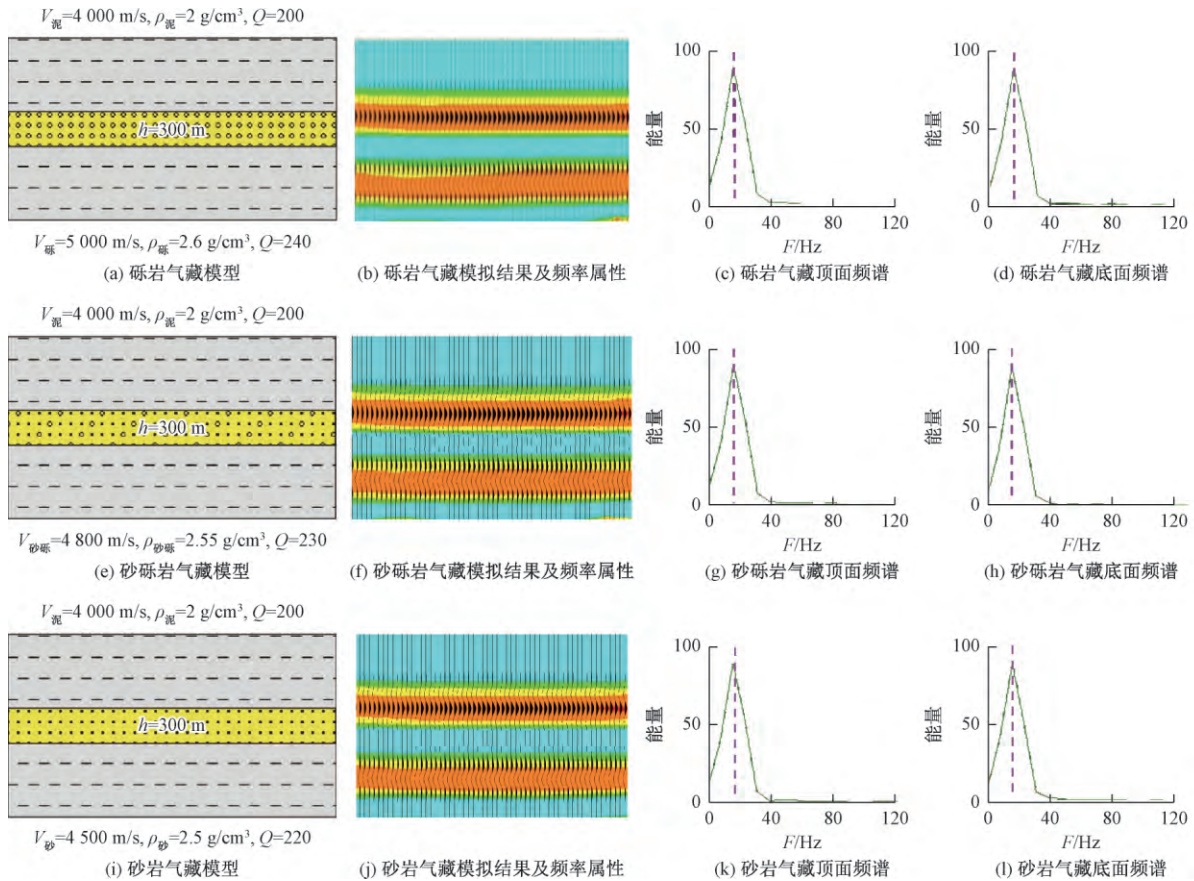


图 4 不同岩性模型正演模拟及地震频变特征

Fig. 4 Forward modeling and seismic frequency variation characteristics of different lithologic models

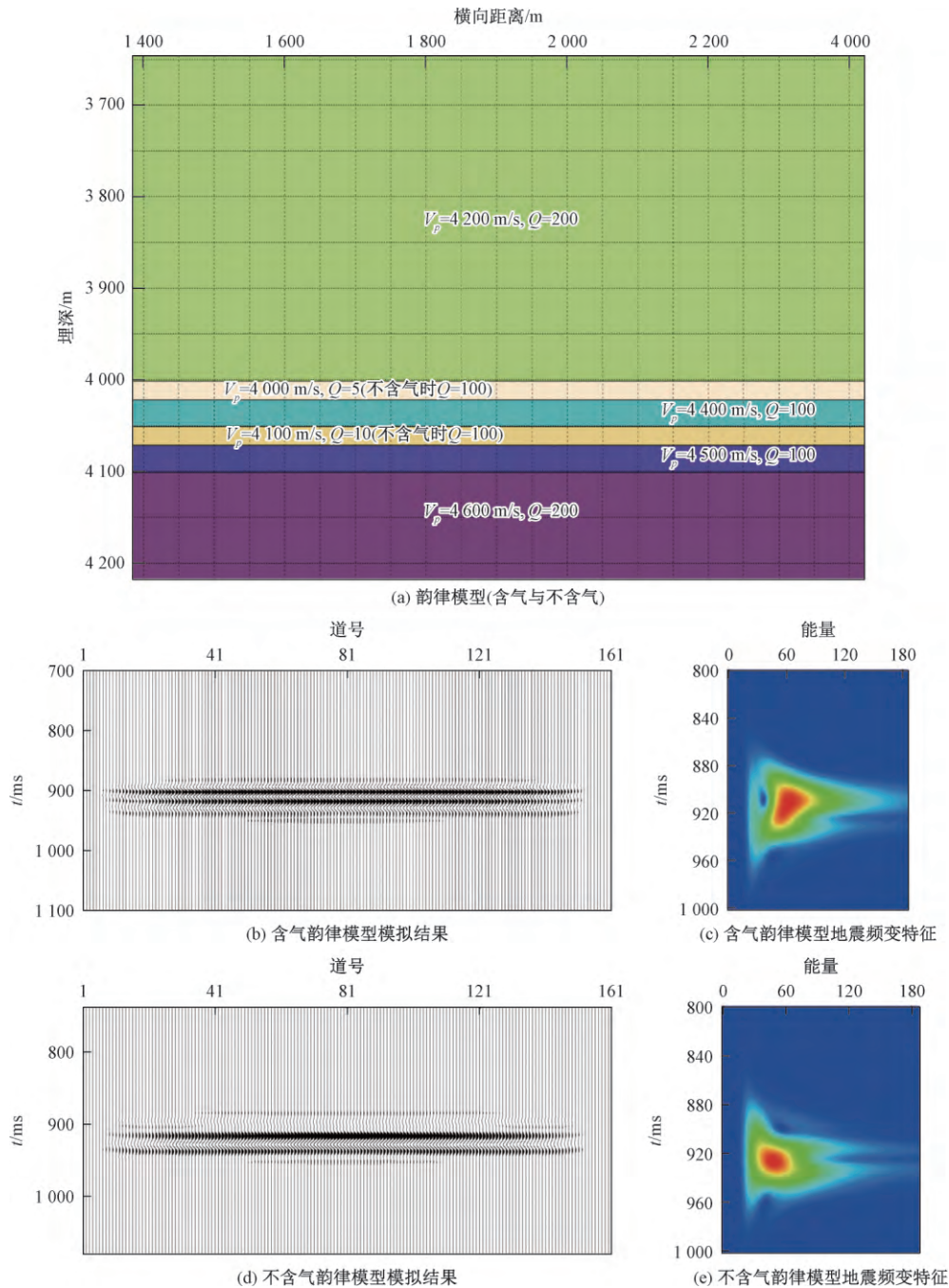


图 5 不含气与含气韵律模型时频特征分析

Fig. 5 The time-frequency characteristic analysis of non gas and gas bearing prosody models

度、储层岩性、储层含气性、地层韵律性等五个因素对地震频变特征的影响进行了对比分析。

频变特征影响因素中,储层含气性会导致最大的地震频变量,在含气楔形模型地震正演分析中,峰值频率最大减小量达到 12 Hz(包含厚度变化引起的频变),且随着含气饱和度增大,峰值频率减小量增大。在层状模型中当 $Q = 5$ 时,峰值频率减小量达到 4 Hz。对于地层埋深,从浅层到深层,地震峰值频率从 45 Hz 降到 15 Hz,频变幅度较大,但是随着埋深增大,峰值频率随时间(埋深)变化的减小率会

逐渐减小。针对某一目的层系,尤其是对于埋深较大的深层致密碎屑岩气藏,埋深达到 3 000 ms 时,时间每增加 100 ms,地震峰值频率的减小量约为 0.5 Hz,小于含气性对地震频变的影响。储层厚度对地震频变的影响表现为随着储层厚度增厚,地震峰值频率大幅度减小、小幅度增大、小幅度减小、基本保持不变。储层厚度在 0.375λ 范围内变化时引起的地震峰值频率变化量最大,约为 9 Hz。 0.375λ 对应储层厚度为 27.5 m,勘探实践中,储层厚度多小于该厚度。储层厚度在该范围内变化时,储层厚

度每增加 20% 时,引起约 1.8 Hz 的峰值频率减小量,对频变影响较大。对于深层致密碎屑岩储层,由于埋深较大、储层致密、不同类型储层以及储层与围岩之间波阻抗差异小,储层岩性和地层韵律性对地震频率的影响较小,可以不考虑。

对于埋深在一定范围内的某一具体目的层系,尤其是埋深较大的致密碎屑岩储层,埋深对地震频变特征影响较小,储层厚度和储层含气性是影响地震频变特征的主要因素,当其厚度变化不大时可以使用地震频变属性进行含气性检测,但需注意储层厚度变化造成的多解性。

3.2 民丰地区实际地震资料频变特征分析

在上述地震正演模拟分析的基础上,利用民丰地区实际地震资料分析了已钻井气层与非气层地震频变特征的差异性。为了更好地描述其变化特征,首先定义了一个参数峰值频率变化率 M ,该变化率的含义是峰值频率的变化量与时间变化量之间的比值,可用于描述目的层顶底频率变化特征[图 6(a)]公式如下

$$M = \Delta F / \Delta T \quad (2)$$

式(2)中: M 为峰值频率变化率; ΔF 为峰值频率变化量,Hz; ΔT 为时间变化量,ms。

对丰深 1、丰深 10 等 9 口井做了过井地震时频谱,并且统计分析了试油井段峰值频率变化率与日

产气量[图 6(b)]。从统计结果来看,丰深 1、丰深 3、坨深 4 井日产气量较高,均大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其对应的峰值频率变化率大于 0.3;丰深 10、丰深 6、丰深 4、丰 8 井日产气量较低,低于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其对应的峰值频率变化率在 0.2~0.3;丰深 2 和丰深 5 井为水层,峰值频率变化率小于 0.2。由此可看出,峰值频率变化率与日产气量之间具有较好的对应关系,针对实际地震资料,可以利用地震频变特征开展致密碎屑岩储层含气性检测。同时,峰值频率变化率与日产气量之间量化关系及地震频变属性的提取方法仍需要开展进一步攻关研究。

4 结论

(1) 对于埋深较大的深层致密碎屑岩气藏,储层厚度和含气性是影响地震频变特征的主要因素,埋深、地层韵律性、储层岩性引起的地震峰值频率变化量较小。

(2) 针对某一具体目的层系,埋深在一定范围内(民丰地区 $> 3000 \text{ ms}$),储层厚度在一定范围内变化时(储层厚度小于 0.375λ ,厚度变化小于 20%),可以使用地震频变属性进行含气检测。

(3) 通过实际地震资料地震频率变化率与日产气量对比分析,可以利用地震频变特征开展致密碎屑岩储层含气性检测。

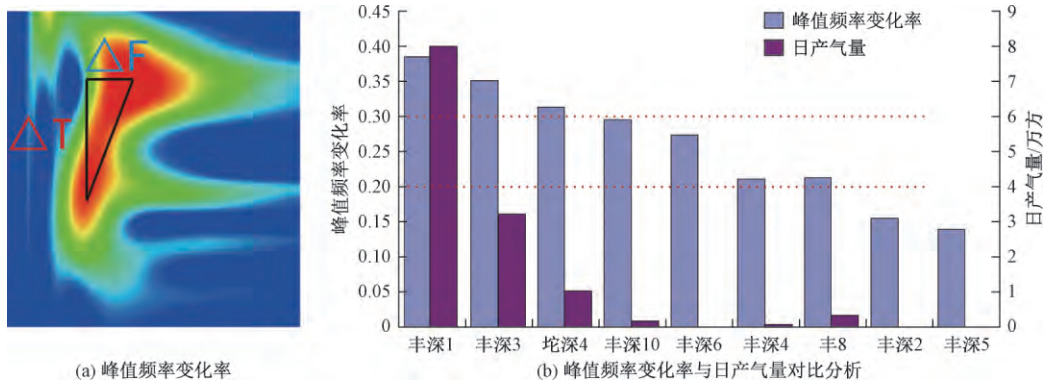


图 6 峰值频率变化率及其与日产气量对比分析

Fig. 6 Peak frequency-variation-rate and its comparison with daily gas production

参 考 文 献

- 王红,李红梅,魏文,等.浅层河流相天然气藏预测技术[J].石油地球物理勘探,2015,50(6):1166-1172
Wang Hong, Li Hongmei, Wei Wen, et al. Gas reservoir prediction in shallow-fluvial facies[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(6): 1166-1172
- 王树刚,李红梅,王红,等.东营北带东部盐下深层砂砾岩体有效储层地震识别[J].石油物探,2013,52(5):553-558
Wang Shugang, Li Hongmei, Wang Hong, et al. Seismic identification of effective reservoirs for the subsalt deep glutenite in the east of

- Northern Dongying Sag[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(5): 553-558
- 蔡伟祥,龚福华,汪勇,等.结合地质统计学反演的综合储层研究与应用[J].科学技术与工程,2016,16(16):128-135
Cai Weixiang, Gong Fuhua, Wang Yong, et al. Comprehensive research and application of reservoir in combination with geostatistical inversion[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16): 128-135
- 柴绪兵.“亮点”“暗点”技术在太平川南地区葡萄花油层油气检测中的应用效果分析[J].科学技术与工程,2012,12(9):2132-2136
Chai Xubing. The effectiveness analysis of using “Bright Spots”,

- “Dim Spots” technique to test oil and gas in Putaohua reservoir of Taipingchuan region [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(9): 2132-2136
- 5 高云, 朱应科, 赵华, 等. 叠前同时反演技术在砂砾岩体有效储层预测中的应用[J]. *石油物探*, 2013, 52(2): 223-228
Gao Yun, Zhu Yingke, Zhao Hua, et al. Application of prestack simultaneous inversion technique in effective reservoir prediction of sand-gravel body [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(2): 223-228
- 6 邓继新, 王尚旭. 储层砂岩纵波衰减的实验结果分析[J]. *石油物探*, 2008, 47(4): 346-351
Deng Jixin, Wang Shangxu. Experimental analysis of P-wave attenuation in sandstone of reservoir with ultrasonic frequency [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 47(4): 346-351
- 7 陈勇, 陈洪德, 关达, 等. 低频阴影技术在生物礁油气储层预测中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(26): 7613-7618
Chen Yong, Chen Hongde, Guan Da, et al. Application of low-frequency shadow technology in prediction of organic reef oil and gas reservoir [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(26): 7613-7618
- 8 宋效文, 马世忠, 秦秋寒, 等. 频谱分解技术在深层致密砾岩气藏检测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(1): 107-114
Song Xiaowen, Ma Shizhong, Qin Qiuhuan, et al. Application of spectral decomposition in deep tight conglomerate reservoir prediction [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(1): 107-114
- 9 孙振涛, 金宁宁. 频散振幅随偏移距变化反演方法在致密碎屑岩储层烃类检测中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(11): 176-180
Sun Zhentao, Jin Ningning. Research on predicting the hydrocarbon of the compacted clastic rock reservoir by the frequency dependent AVO inversion [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(11): 176-180
- 10 李生杰, 施行觉, 王宝善, 等. 地层衰减在地震记录上的特征分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(3): 248-253
Li Shengjie, Shi Xingjue, Wang Baoshan, et al. Analyzing characters of formation attenuation on seismic records [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(3): 248-253
- 11 刘华, 蒋有录, 徐浩清, 等. 东营凹陷民丰地区深层裂解气藏成因类型与成藏模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(6): 1638-1646
Liu Hua, Jiang Youlu, Xu Haoqing, et al. Genetic types and accumulation model of the deep cracked gas pools of Minfeng area in Dongying Sag [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(6): 1638-1646
- 12 李桂梅. 叠前地震反演预测民丰地区沙四段盐下砂砾岩体含油气性[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 52-54
Li Guimei. Application of pre-stack seismic inversion to predicting hydrocarbon for conglomerate body in Minfeng area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 52-54
- 13 张玉亮. 地震波频率衰减特性及能量增强方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009
Zhang Yuliang. Study on frequency-dependent depression of seismic waves and methods of energy enhancement [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009
- 14 王宝善, 孙道远, 李生杰, 等. 岩石非均匀性对超声波衰减的影响及其修正[J]. *中国地震*, 2001, 17(1): 1-7
Wang Baoshan, Sun Daoyuan, Li Shengjie, et al. The effect of heterogeneity on rock's ultrasonic attenuation and its correction [J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(1): 1-7
- 15 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 Shujin, Dong Ning, Yu Changqing. The application of seismic attenuation technology for reservoir prediction in Erdos basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(2): 182-185
- 16 王海洋, 孙赞东, Mark Chapman. 岩石中波传播速度频散与衰减[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 332-342
Wang Haiyang, Sun Zandong, Chapman M. Velocity dispersion and attenuation of seismic wave propagation in rocks [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(2): 332-342
- 17 付志方. 地震储层预测技术及应用研究——以西湖凹陷孔雀亭地区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007
Fu Zhifang. Techniques and applied studying of reservoir prediction based on seismic—A studying case of Kongqueting area, Xihu Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007
- 18 孙鲁平, 郑晓东, 首皓, 等. 薄层地震峰值频率与厚度关系研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2): 254-271
Sun Luping, Zheng Xiaodong, Shou Hao, et al. The studies on relationship between thin layer seismic peak frequency and its thickness [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(2): 254-271
- 19 刘喜武, 宁俊瑞, 刘培体, 等. 地震时频分析与分频解释及频谱分解技术在地震沉积学与储层成像中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(5): 1679-1688
Liu Xiwu, Ning Junrui, Liu Peiti, et al. Seismic time-frequency analysis for frequency decomposition with application to seismic sedimentology and reservoir imaging [J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(5): 1679-1688

Main Controlling Factors Quantitative Analysis of Seismic Frequency-varying Characteristics of Tight Clastic Gas Reservoirs

LIU Hai-ning^{1 2}, HAN Hong-wei², CAO Ying-chang^{1*}, LI Hong-mei², WEI Wen²

(School of Geosciences , China University of Petroleum (East China)¹ , Qingdao 266580 , China;

Shengli Geophysical Research Institute of SINOPEC² , Dongying 257022 , China)

[Abstract] It is an important research area to detect deep tight clastic gas reservoirs using seismic frequency-varying attributes. But there are many factors affecting the seismic frequency-varying characteristics. It is necessary to conduct quantitative analysis of control factors. Based on the actual geological conditions in Minfeng area of Dongying depression, the seismic forward modeling technique was used and it was carried out that quantitative analysis of buried depth, lithology, reservoir thickness and other factors affecting frequency-varying characteristics of tight clastic gas reservoirs. A comparative analysis of seismic frequency-variation-rate and daily gas production is made by using actual seismic data. The analysis shows that the reservoir thickness and gas-bearing property are the main factors affecting the characteristics of seismic frequency variation under a certain buried depth. There is a good correlation between seismic frequency-variation-rate and daily gas production. For a specific target layer, its thickness varies within a certain range, and the reservoir gas-bearing property can be predicted by using seismic frequency-varying characteristics.

[Key words] Dongying depression frequency-varying characteristics controlling factor tight clastic reservoir gas detection