

文章编号: 0253-2697(2012)04-0633-07

## 砂岩油藏地震数据流体替换

李景叶<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室 北京 102249)

**摘要:** 流体替换常用于计算油藏流体变化前后岩石弹性参数变化, 是进行地震油藏描述与监测研究的关键步骤。流体替换需要孔隙度、岩石基质、流体属性和泥质含量等数据信息, 因此目前往往只能在有测井数据的油藏部分进行流体替换, 并通过地震数值模拟获取流体变化前后地震响应, 从而进行地震属性分析与优化。为了扩大流体替换应用范围, 提出利用地震资料直接进行流体替换。在确定油藏流体类型与岩石物理模型基础上, 建立油藏地质模型, 模拟油藏流体变化前后地震反射振幅峰值关系, 并分析储层参数(包括孔隙度、储层厚度和泥质含量等)变化时该振幅关系变化特征。采用曲线拟合方式对该振幅峰值关系进行计算, 得到可直接应用于地震数据的流体替换线性拟合方程, 从而进行实际地震数据流体替换。基于胶结砂岩油藏岩石物理模型的模拟分析与实际资料应用试验, 证明了基于地震数据流体替换的可行性。

**关键词:** 流体替换; 胶结砂岩模型; 孔隙度; 泥质含量; 地震数据

中图分类号: P631

文献标识码: A

### Fluid substitution based on seismic data of sand reservoirs

LI Jingye<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Lab of Geophysical Exploration, CNPC, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Fluid substitution is commonly used to compute elastic property parameters of rocks before and after the variation of reservoir fluids, which is a key procedure in seismic reservoir characterization and monitoring. However, fluid substitution requires the information on parameters of rock porosity and matrix, fluid properties, clay content, etc. Therefore, at present fluid substitution can be only conducted on the part of a reservoir that has available log data, and the dynamic seismic response of fluid variations is obtained through seismic numerical simulation during seismic attribute analysis and optimization. In order to expand the application of fluid substitution, we proposed to directly conduct fluid substitution by utilizing seismic data, in which a geologic model of oil reservoirs was established to simulate the amplitude peak-value correlation of seismic reflection between wet and gas reservoirs according to the determination of reservoir fluid types and petrophysical models, and to characterize variations in the amplitude correlation dynamically with the change of reservoir parameters, including porosity, thickness and clay content. The correlation was calculated by means of curve fitting to obtain a linear equation of fluid substitution capable of the direct application to seismic data, achieving the fluid substitution of in-situ seismic data. Both the simulation analysis based on the petrophysical model of cemented-sand reservoirs and the application experiment of in-situ seismic data have proved the feasibility of directly conducting fluid substitution based on seismic data.

**Key words:** fluid substitution; cemented-sand model; porosity; clay content; seismic data

流体替换是地震油藏描述与监测过程中非常重要的环节, 应用广泛<sup>[1-3]</sup>。在时移地震研究中, 基于流体替换与地震模拟分析不同油藏流体变化引起的地震差异, 从而进行时移地震可行性分析与差异地震资料解释<sup>[4-6]</sup>。在油藏描述研究前, 利用测井资料进行流体替换, 从而进行地震有效属性分析与优选<sup>[7-8]</sup>。在实际油田条件下, 流体替换是基于测井曲线和实验室岩心测量数据建立的岩石物理关系利用 Gassmann 方程进行

的<sup>[9]</sup>。而目前的研究主要集中在如何修改或修正 Gassmann 方程从而使其更好适应各类不同特征储层岩石。由于需要油藏厚度、孔隙度、泥质含量和流体属性等信息, 目前实际油藏流体替换只能在测井曲线上进行, 这很大程度上限制了该技术的应用。流体替换的目的是建立饱和和水储层与含油气储层地震响应之间的关系。因此, 能否利用油藏岩石物理模型和饱和水储层地震反射振幅直接计算含油气储层地震响应, 有

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41074098)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209606)资助。

第一作者及通讯作者: 李景叶, 男, 1978 年 11 月生, 2005 年获中国石油大学(北京)工学博士学位, 现为中国石油大学(北京)地球物理与信息工程院副教授, 主要从事开发地震和地震、地质一体化研究。Email: ljy3605@sina.com



效降低测井资料约束,大幅提高流体替换研究应用范围,对地震油藏描述与监测十分有利。

利用有限的钻探数据确定油藏流体类型,并采用岩石物理诊断方法确定适合描述目标油藏的岩石物理模型以及相关参数。建立油藏地质模型,并利用褶积模型模拟油藏流体替换前后地震响应。计算分析流体替换前后油藏反射界面对应地震反射振幅峰值关系,并通过变化模型储层参数(包括孔隙度、储层厚度和泥质含量等),分析储层参数变化时该振幅峰值关系变化特征。采用曲线拟合方式对该振幅峰值关系进行计算,得到可直接应用于地震数据的流体替换线性拟合方程,从而进行实际地震数据流体替换。基于胶结砂岩油藏岩石物理模型的地震模拟分析与实际地震资料应用试验,证明了基于地震数据流体替换的可行性。

## 1 地震与岩石物理模型

为了分析饱和水储层与含油气储层地震响应之间关系,研究建立三层地质模型,顶层与底层为饱和水泥岩层,研究过程中油藏参数保持不变。中间层为砂岩储层,研究过程中其厚度、孔隙度和泥质含量及其组合发生变化。砂岩储层为胶结砂岩,可以利用胶结砂岩模型进行描述。胶结砂岩模型基于 Hashin-Shtrikman 的上边界推导得到<sup>[10]</sup>,可以计算胶结砂岩干岩石有效体积模量( $K_{\text{eff}}$ )和剪切模量( $G_{\text{eff}}$ )。岩石物理模型方程如方程(1)和(2)所示<sup>[11]</sup>:

$$K_{\text{eff}} = \left[ \frac{\phi/\phi_0}{K_{\text{IM}} + \frac{4}{3}G} + \frac{1-\phi/\phi_0}{K + \frac{4}{3}G} \right]^{-1} = \frac{4}{3}G \quad (1)$$

$$G_{\text{eff}} = \left\{ \left[ \frac{\phi/\phi_0}{G_{\text{IM}} + \frac{G}{6} \left( \frac{9K+8G}{K+2G} \right)} \right] + \left[ \frac{1-\phi/\phi_0}{G + \frac{G}{6} \left( \frac{9K+8G}{K+2G} \right)} \right] \right\}^{-1} - \frac{G}{6} \left( \frac{9K+8G}{K+2G} \right) \quad (2)$$

式中: $\phi$ 和 $\phi_0$ 为岩石孔隙度和临界孔隙度; $K$ 和 $G$ 为岩石基质体积模量和剪切模量,GPa; $K_{\text{IM}}$ 和 $G_{\text{IM}}$ 为一定有效压力下随机排列同规格球堆体积模量与剪切模量,GPa,可以利用 Hertz-Mindlin 接触理论模型进行计算。

岩石饱和不同流体时体积模量与剪切模量采用 Gassmann 方程进行计算,如方程(3)和(4)所示。

$$K_{\text{wet}} = K \frac{\phi K_{\text{eff}} - (1-\phi)K_1 K_{\text{eff}}/K + K_1}{(1-\phi)K_1 + \phi K - K_1 K_{\text{eff}}/K} \quad (3)$$

$$G_{\text{wet}} = G_{\text{eff}} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{wet}}$ 和 $K_1$ 分别为饱和流体岩石体积模量和孔隙流体体积模量,GPa; $G_{\text{wet}}$ 和 $G_{\text{eff}}$ 分别为饱和流体岩石

和干岩石剪切模量,GPa。

砂岩储层骨架由石英与黏土组成,泥质含量(C)变化范围为0.0~0.20,孔隙度( $\phi$ )变化范围0.0~0.30,孔隙流体为含水饱和度为1.0和含水饱和度0.40、含气饱和度0.60两种情况。矿物与流体属性参数如表1所示。为了消除地震模拟计算过程中地震子波频率对试验结果的影响,研究中用地震子波波长( $\lambda$ )描述砂岩储层厚度,储层厚度( $h$ )变化范围为 $\lambda/2 \sim \lambda/16$ 。

表1 计算试验中矿物与流体属性<sup>[12]</sup>

Table 1 Mineral and fluid properties used in computations

组分	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
石英	36.60	45.00	2.65
黏土	21.00	7.00	2.58
地层水	2.54	0.00	0.98
甲烷气	-0.053	0.00	0.166

基于建立的三层地质模型以及各层油藏参数,利用胶结砂岩模型计算地质模型各层对应的弹性参数。利用计算得到的弹性参数将模型从深度域转换到时间域,固定入射角度,并利用 Zoeppritz 方程计算反射系数序列。将计算得到反射系数序列与雷克子波(或基于实际地震资料提取子波)褶积合成该入射角度对应地震数据,通过调整入射角度并重复上述工作从而合成不同入射角度对应地震数据,对不同入射角度对应地震数据进行叠加得到叠后地震数据。提取油藏顶反射界面对应地震振幅峰值,得到饱和水储层顶界面地震反射振幅( $R_{\text{wet}}$ )与含气储层顶界面地震反射振幅( $R_{\text{gas}}$ )的关系,并分析孔隙度、泥质含量和储层厚度及其组合变化对两者关系的影响,并最终通过曲线拟合获得能直接用于地震数据流体替换的函数关系。

## 2 数值试验结果与分析

实际油藏条件下,储层的厚度、孔隙度和泥质含量都随储层沉积环境变化而变化<sup>[13-14]</sup>,并且这些参数在没有测井资料条件下是不能直接从地震资料中获取的。为了简化要研究的问题,在数值试验过程中,先假定其他参数不变,而逐一分析单一因素变化时饱和水储层顶界面地震反射振幅( $R_{\text{wet}}$ )与含气储层顶界面地震反射振幅( $R_{\text{gas}}$ )关系的变化,再进行多参数变化组合分析。

首先假定油藏泥质含量保持不变(为0.10),而孔隙度变化范围为0.10~0.30。计算不同储层厚度( $h$ )( $\lambda/2, \lambda/4, \lambda/8$ 和 $\lambda/16$ )条件下, $R_{\text{wet}}$ 与 $R_{\text{gas}}$ 之间的关系,计算结果如图1所示。数值计算结果表明,泥质含

量不变而孔隙度变化时不同储层厚度条件下  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  之间都呈现很好的线性关系。为了消除厚度影响,将图 1 中不同砂岩厚度  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  交汇图叠合得到如图 2 所示结果,也呈现很好的线性关系,拟合的线

性方程如式(5)所示。因此储层厚度和孔隙度变化而泥质含量不变条件下,利用  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  之间线性方程可以实现基于地震数据的流体替换。

$$R_{Gas} = 1.1366 R_{Wet} - 0.0483 \quad (5)$$

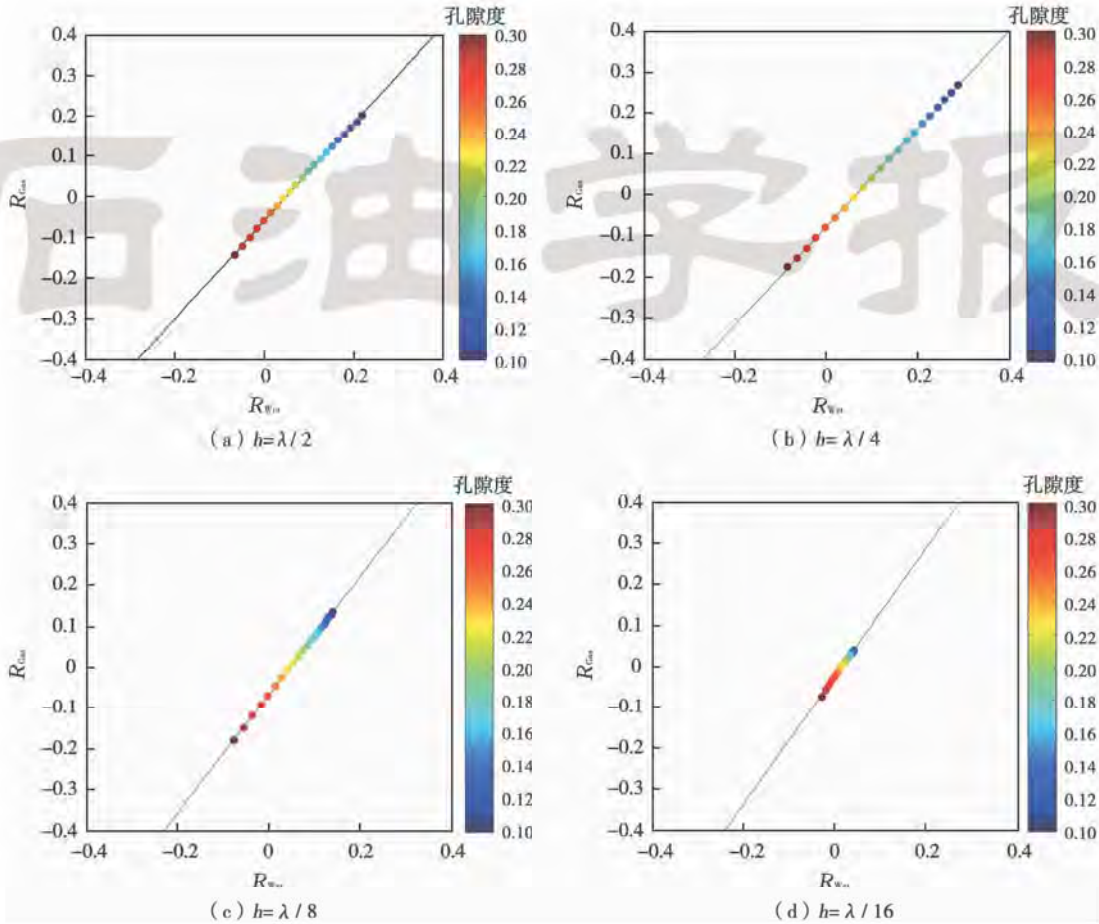


图 1 储层泥质含量不变而孔隙度变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值关系

Fig. 1 Reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of the wet reservoir at a fixed clay content and varying porosity

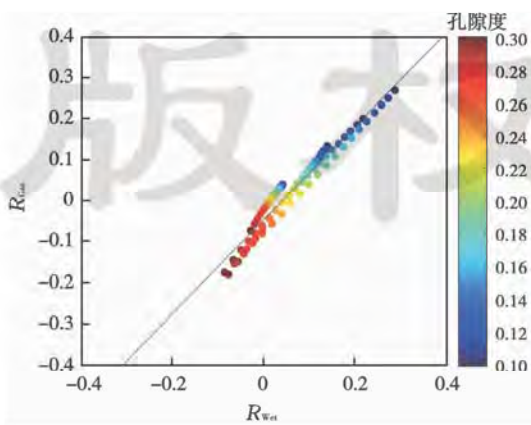


图 2 储层泥质含量不变而孔隙度变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值交汇叠合

Fig. 2 Combined cross-plot of reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of wet reservoir at a fixed clay content and varying porosity

接下来假定油藏孔隙度保持不变(为 0.25),而泥质含量变化范围为 0.0~0.20。计算不同储层厚度 ( $h$ ) ( $\lambda/2, \lambda/4, \lambda/8$  和  $\lambda/16$ ) 条件下,  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  之间的关系,计算结果如图 3 所示。数值计算结果表明,孔隙度不变而泥质含量变化时不同储层厚度条件下  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  之间都呈现很好的线性关系,与图 1 相比,泥质含量变化对  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  关系的影响相对于孔隙度变化影响要小的多。同样,为了消除厚度影响,将图 3 中不同砂岩厚度  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  交汇图叠合得到如图 4 所示结果,两者呈现较好的线性关系,拟合的线性方程如式(6)。因此储层厚度和泥质含量变化而孔隙度不变条件下,利用  $R_{Wet}$  与  $R_{Gas}$  之间线性方程可以实现基于地震数据的流体替换。

$$R_{Gas} = 0.8925 R_{Wet} - 0.0512 \quad (6)$$



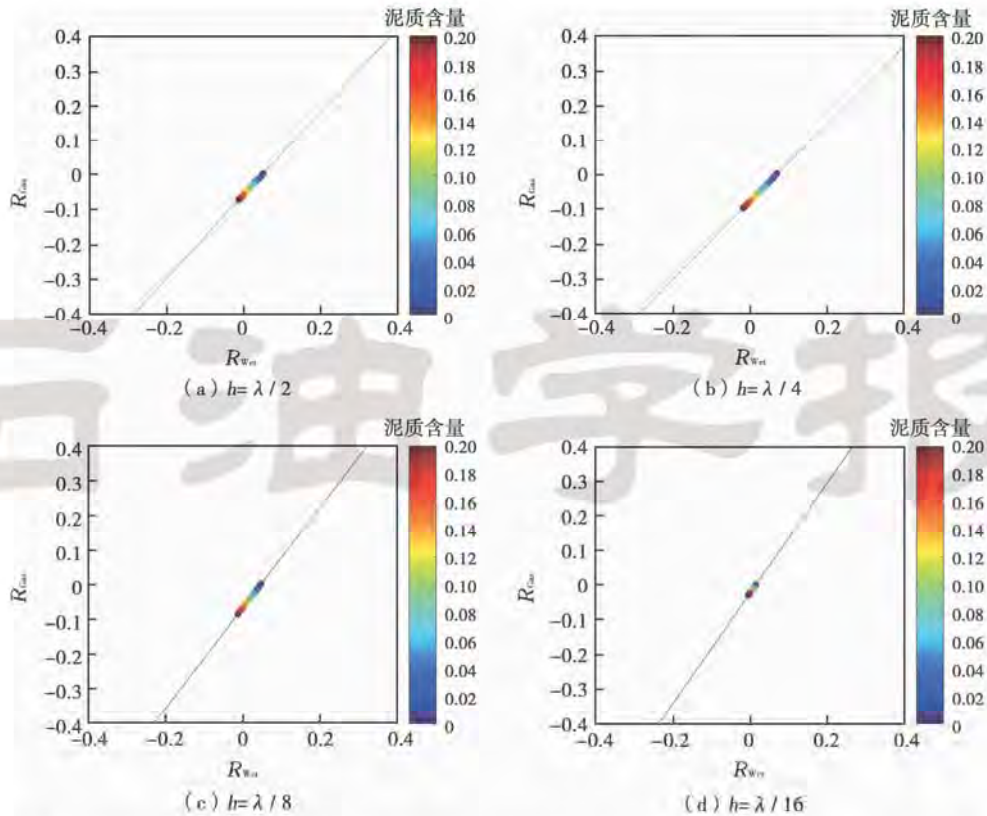


图3 储层孔隙度不变泥质含量变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值关系

Fig. 3 Reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of the wet reservoir at a fixed porosity and varying clay content

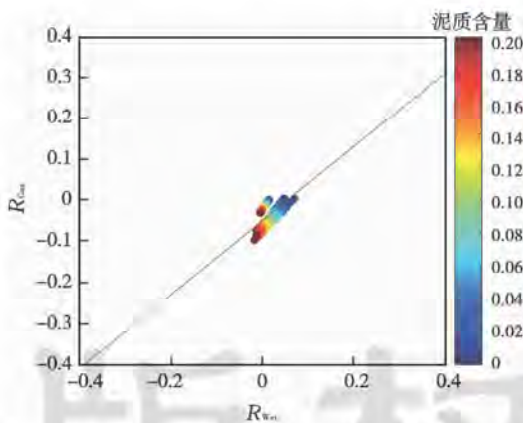


图4 储层孔隙度不变泥质含量变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值交汇叠合

Fig. 4 Combined cross-plot of reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of the wet reservoir at a fixed porosity and varying clay content

实际油藏条件下,储层的厚度、孔隙度和泥质含量都随储层沉积环境变化而变化,并且这些参数在没有测井资料条件下都不能直接从地震资料中获取的。为了建立储层的厚度、孔隙度和泥质含量同时变化时 $R_{wet}$ 与 $R_{Gas}$ 之间函数关系,一种方案考虑到油藏泥质含量变化对 $R_{wet}$ 与 $R_{Gas}$ 关系影响较小,可以忽略泥质

含量变化对两者关系的影响,但这会在一定程度上影响地震流体替换的精度。另一种方案是基于实际岩石物理资料建立孔隙度与泥质含量之间的关系,该方案物理意义明确,黏土通常充填砂岩储层有效孔隙,因此泥质含量越高砂岩储层孔隙度越低。图5(a)为基于某油田胶结砂岩油藏实际测井资料得到的孔隙度与泥质含量交汇图。数据交汇分析表明,随着储层砂岩孔隙度的降低,储层泥质含量逐渐升高,如图中红色箭头所示,因此建立孔隙度与泥质含量之间的关系是可行的。为了提高建立的孔隙度与泥质含量之间方程的精度,应针对研究储层并在一定深度范围内建立两者之间关系。图5(b)为3415.1~3491.4m深度范围内研究砂岩储层的孔隙度与泥质含量交汇及数据拟合曲线,孔隙度与泥质含量数据拟合曲线如方程(7)所示。

$$C = -61.3975 \phi^3 + 40.1796 \phi^2 - 8.6370 \phi + 0.6348 \quad (7)$$

在建立了油藏孔隙度与泥质含量关系后,将该方程应用于建立储层的厚度、孔隙度和泥质含量同时变化时 $R_{wet}$ 与 $R_{Gas}$ 之间的函数关系。假定油藏孔隙度变化范围为0.10~0.30,而泥质含量随孔隙度按方程(7)而变化。计算不同储层厚度( $h$ )( $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 、 $\lambda/8$ 和 $\lambda/16$ )条件下, $R_{wet}$ 与 $R_{Gas}$ 之间的关系,并将不同砂

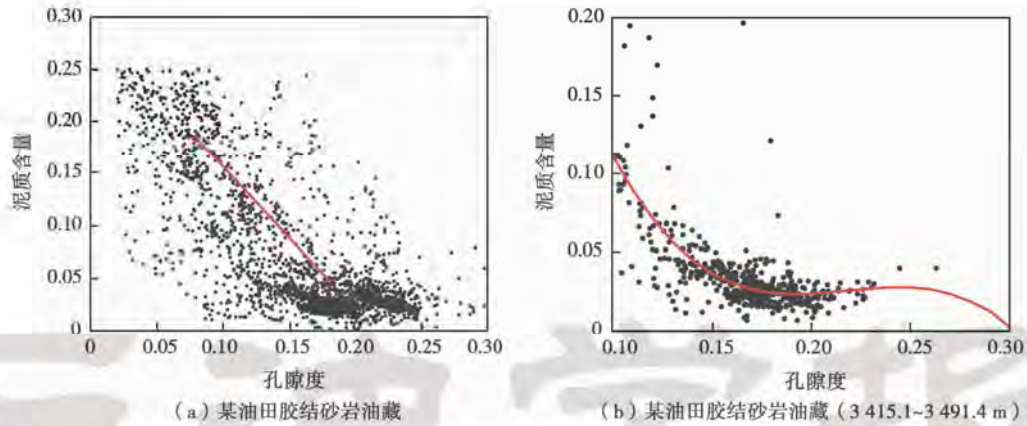


图 5 基于胶结砂岩油藏实际测井资料计算孔隙度与泥质含量交汇  
 Fig. 5 Cross plot of porosity and clay content from real cemented-sand reservoir log data

岩厚度  $R_{wet}$  与  $R_{gas}$  交汇图叠合得到如图 6 所示结果,  $R_{wet}$  与  $R_{gas}$  呈现很好的线性关系, 拟合的线性方程如式(8)所示。因此在储层厚度、孔隙度和泥质含量同时变化条件下, 利用方程(8)所示  $R_{wet}$  与  $R_{gas}$  之间线性方程可以实现基于地震数据的流体替换。

$$R_{gas} = 1.0826 R_{wet} - 0.0416 \quad (8)$$

### 3 实际资料应用试验

模拟数据分析表明, 不同油藏参数变化时, 饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值之间有很好的线性关系。下面利用同样的研究方法和思路对实际油田地震数据进行流体替换试验。研究的实际油田为砂岩油藏, 储层地震反射特征明显, 如图 7 所示, 图中红线表示储层顶反射峰值点, 储层砂体连续性好。但该区有限的钻探结果表明该储层不是预期的气层而是水层。为了获得储层含气时的地震反射振幅特征, 需要进行基于地震数据的流体替换。首先利用有限的测井数据采用岩石物理诊断方法确定适合描述储层的岩石物理模型以及相关岩石物理参数。岩石物理诊断结果如图 8 所示, 图中黑色实线为基于理论模型计算的结果, 数据分析表明目标油藏岩石物理参数可以利用如式(1)和(2)所示的胶结砂岩模型进行表征。为了对建立的含气储层与饱和水储层地震反射振幅关系进一步约束, 针对储层分析泥质含量变化与孔隙度变化关系, 基于线性拟合得到的两者之间关系如式(9)所示。

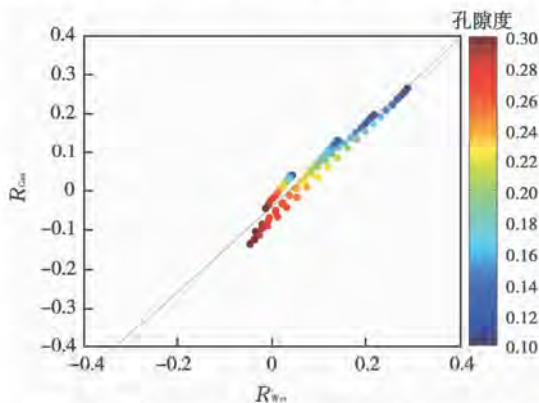


图 6 储层泥质含量与孔隙度变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值交汇叠合

Fig. 6 Combined cross-plot of reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of the wet reservoir at varying clay content and porosity

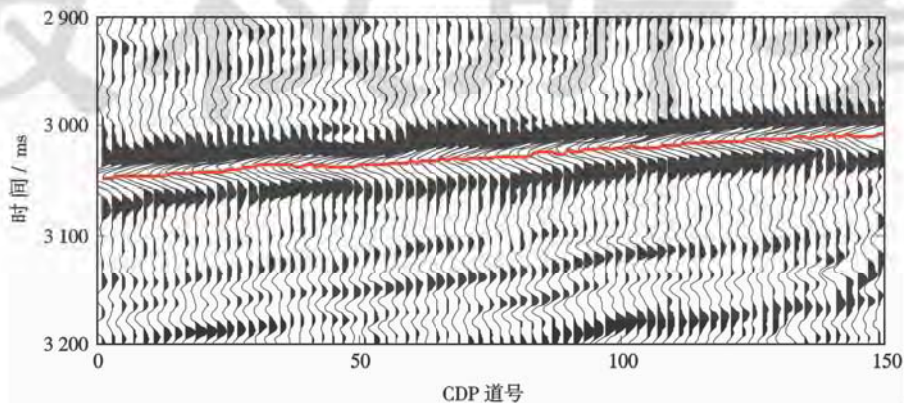


图 7 实际油田叠后地震数据剖面

Fig. 7 Post-stack seismic section of the real reservoir



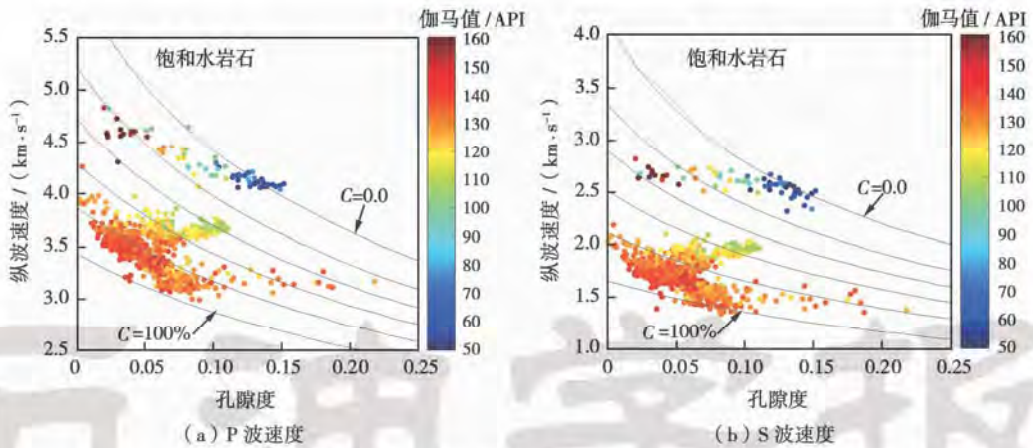


图8 实际油藏 P 波速度 (a) 与 S 波速度 (b) 岩石物理诊断结果  
 Fig. 8 Rock physical diagnosis results for P wave velocity (a) and S wave velocity (b)

$$C = -5.7259\phi + 0.9362 \quad (9)$$

基于确定的储层岩石物理模型和相关参数,以及拟合得到的泥质含量变化与孔隙度变化关系,利用上文中提到的相同方法模拟不同储层厚度、孔隙度和泥质含量条件下饱和水储层与含气储层地震反射数据,分析饱和水储层与含气储层顶地震反射振幅峰值关系。不同储层厚度模拟分析结果叠合后数据如图9所示,而基于线性拟合得到的饱和水储层与含气储层顶地震反射振幅峰值关系方程如式(10)所示。基于实际地震数据提取饱和水储层顶地震反射振幅峰值,并利用建立的地震数据流体替换方程(10)计算含气储层顶地震反射振幅峰值,计算结果对比如图10所示。

$$R_{Gas} = 1.5492R_{Wet} - 0.0557 \quad (10)$$

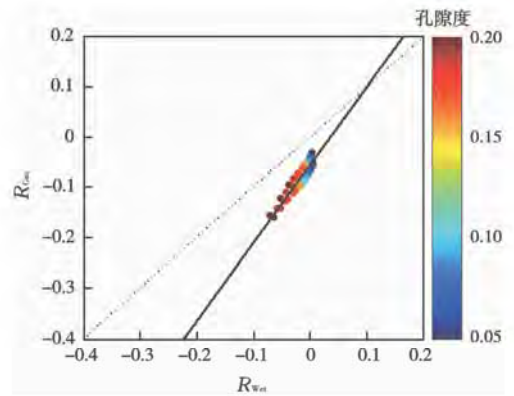


图9 实际油藏储层泥质含量与孔隙度变化时饱和水储层与含气储层顶界面地震反射振幅峰值交汇叠合  
 Fig. 9 Combined cross-plot of reflection peak amplitude at the top of gas reservoir versus that of the wet reservoir at varying clay content and porosity in real reservoir

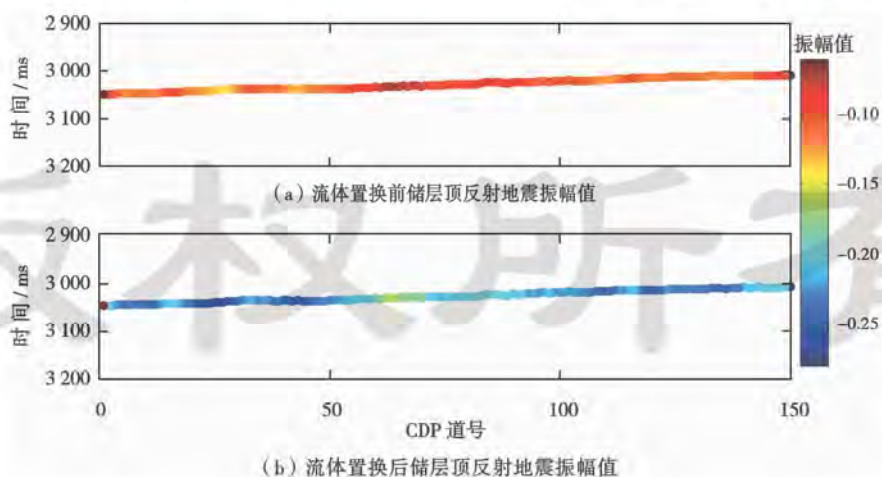


图10 基于地震数据流体替换前(a)、后(b)储层顶反射振幅峰值变化

Fig. 10 Reflection peak amplitude at the top of reservoir before (a) and after (b) fluid substitution based on seismic data

### 4 结论

(1) 虽然研究基于岩石物理模型与地震模拟之间

关系,但研究结果已表明当油藏厚度、泥质含量和孔隙度变化时利用地震数据进行流体替换是可行的。

(2) 研究基于胶结砂岩岩石物理模型得到地震数

据流体替换方程,将该方法与研究思路应用于其他类型岩石储层,可以得到类似方程。在实际应用中可以根据实际油藏条件变化参数变化范围,得到最有效拟合方程。

(3) 实际地震资料和模拟地震资料振幅存在较大差异,因此在应用拟合方程进行流体替换前需要对实际地震资料进行振幅标准化处理。

(4) 为了拓展该研究,下一步我们将该方法和思路应用于叠前地震数据和其他地震属性,如斜率和梯度等,使基于地震数据流体替换的应用范围更为广泛、有效。

**致谢** 本研究是在美国斯坦福大学地球物理系资深研究员 Jack Dvorkin 博士指导下完成的,对其悉心指导与热心帮助在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘洋. 利用地震资料估算孔隙度和饱和度的一种新方法[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 61-64.  
Liu Yang. A new approach to estimation of porosity and saturation with seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 61-64.
- [2] 金龙, 陈小宏, 姜香云. 利用地震资料定量反演孔隙度和饱和度的新方法[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 63-66.  
Jin Long, Chen Xiaohong, Jiang Xiangyun. Simultaneous inversion of porosity and saturation using seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 63-66.
- [3] 李景叶, 陈小宏. 基于地震资料的储层流体识别[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 235-238.  
Li Jingye, Chen Xiaohong. Reservoir fluid identification based on seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 235-238.
- [4] Taher M, Don C. Time-lapse multicomponent seismic modeling of CO<sub>2</sub> fluid substitution in the Devonian Redwater reef, Alberta, Canada[J]. The Leading Edge, 2010, 29(10): 1266-1276.
- [5] Vialle S, Vanorio T, Mavko G. Monitoring the changes of rock properties in a micritic limestone upon injection of a CO<sub>2</sub>-rich fluid[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 2692-2696.
- [6] Jason M, Don C. Seismic characterization of a CO<sub>2</sub> flood in the Ardley coals, Alberta, Canada[J]. The Leading Edge, 2009, 28(7): 820-825.
- [7] Su Y, Tao Y, Wang T, et al. AVO attributes interpretation and identification of lithological traps by prestack elastic parameters inversion: a case study in K Block, South Turgay Basin[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 439-444.
- [8] Singleton S, Keirstead R. Calibration of pre-stack simultaneous impedance inversion using rock physics[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009: 1815-1819.
- [9] Gassmann F. Elasticity of porous media[J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gessellschaft, 1951, 96(1): 1-23.
- [10] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1963, 11(2): 127-140.
- [11] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. The rock physics handbook[M]. New York: Cambridge University Press, 2009: 245-264.
- [12] Batzle M, Wang Z. Seismic properties of pore fluids [J]. Geophysics, 1992, 57(11): 1396-1408.
- [13] 云美厚, 高君, 贺玉山, 等. 储层速度和密度与孔隙度、泥质含量以及含水饱和度的关系[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(2): 104-107.  
Yun Meihou, Gao Jun, He Yushan, et al. Relations of velocity and density with porosity, clay content and water saturation in reservoirs[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(2): 104-107.
- [14] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 870-874.  
Yan Ke, Yang Shaochun, Ren Huaqiang. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 870-874.

(收稿日期 2011-10-15 改回日期 2012-04-09 责任编辑 张 怡)

版权所有