

The Study on Rock Physical Analysis Technique for the Time-Lapse Seismic Monitoring

Xianwen Zhang

CNOOC Research Institute, Beijing
Email: zhangxw4@cnooc.com.cn

Received: Apr. 6th, 2016; accepted: Apr. 22nd, 2016; published: Apr. 25th, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Rock physical analysis is the basis of time-lapse seismic monitoring for reservoir waterflood development, which is the bridge connecting variations of reservoir parameters and changes of the seismic response. We make rock physical analysis on reservoir A of waterflooding development, which includes four aspects time-lapse seismic studies on the feasibility, the response characteristics, reservoir parameters characterization and the results interpretation. The study results show that the reservoir A has the good rock physical conditions, and the variation of fluid and pressure are main influence factors on reservoir velocity and density during oil development. Then the time-lapse seismic response features are obvious for reservoir A, and the elastic parameter $I_p^2 - 2.15I_s^2$ is the most sensitive for the reservoir fluid variation on water-flooding process. As to time-lapse seismic response, the influences of fluid and pressure are opposite, and the more porosity is, the more obvious is time-lapse seismic response.

Keywords

Time-Lapse Seismic, Rock Physic, Reservoir Monitoring, Enhance Oil Recovery, Fluid Variation

岩石物理分析技术在时移地震中的应用研究

张显文

中海油研究总院, 北京
Email: zhangxw4@cnooc.com.cn

文章引用: 张显文. 岩石物理分析技术在时移地震中的应用研究[J]. 应用物理, 2016, 6(4): 68-76.
<http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.64010>

收稿日期：2016年4月6日；录用日期：2016年4月22日；发布日期：2016年4月25日

摘要

岩石物理分析是油藏开发时移地震监测的基础，是连接油藏参数变化和地震响应变化的桥梁。本文以A油田水驱油藏时移地震应用研究为例，系统开展了岩石物理分析在时移地震应用的可行性研究、油藏开发的时移地震响应规律、时移地震油藏参数表征和时移地震综合研究成果解析四个方面的应用研究，结果表明：首先，A油藏流体性质为轻质原油，水驱油表现了较好的岩石物理条件，流体和压力变化是影响油藏开发地层速度和密度变化的主要因素；其次，A油藏具有较好的水驱油时移地震响应特征，弹性参数 $I_p^2 - 2.15I_s^2$ 对水驱油流体变化响应最敏感；另外，油藏开发流体变化和孔隙压力变化对地震响应特征的影响相反，且孔隙度越大，时移地震响应特征越明显。

关键词

时移地震，岩石物理，油藏监测，提高采收率，流体变化

1. 引言

时移地震技术是20世纪80年代发展起来的油藏动态监技术，它是利用不同时间观测的三维地震有效信息的差异，进行储层监测、完善油藏管理方案和提高油气采收率的一项技术。目前，该项技术在国外已经商业化，已成为国外某些区域油田开发常规技术手段，如北海、墨西哥湾、西非深水部分油田，将时移地震技术作为提高采收率的常规技术进行使用，为油田的调整挖潜发挥了重要的作用。在我国大多数油田正逐渐步入油田开发中后期，时移地震技术在优化油田开发和管理，延长油田寿命，提高采收率等方面正在发挥越来越重要的作用，已成为应用地球物理研究的重点领域。

岩石物理分析是油藏开发时移地震监测的基础，是连接油藏参数(如压力、含油饱和度)变化和地震响应变化的桥梁。地震波传播速度以及地震反射振幅受油气储层的岩石和流体性质等因素控制，因此，要想成功对油藏开发进行时移地震监测，必须详细了解油藏开发对储层岩性和流体弹性特性的影响，国内外许多学者做了大量的岩石物理实验研究[1]-[4]，Batzele 和 Wang [5]基于实验数据总结了孔隙流体的地震响应特性，Wang [6]对影响岩石地震特性的各种因素进行了系统分析，并确立了地震岩石物理分析的基准准则。对于水驱油藏时移地震的研究，Wang [7]对水驱过程中油藏变化及其对地震特性的影响进行了全面总结，考虑了油藏压力变化造成溶解气析出、水饱和度变化、注水压力及温度等因素对速度的影响。Batzele [8]总结了不同开采方式对储层地震特性的影响，指出轻油或活油，水驱开采方式有利于时移地震监测，进一步，甘[9]对水驱四维地震技术的可行性及其盲区进行了研究与探讨。云[10]通过岩样实验室测量对时移地震岩石物理基础进行了深入研究，指出了目前岩石物理实验中存在的问题和进一步开展水驱岩石物理实验测量的必要性。

在油藏水驱开采过程中，除了流体饱和度发生变化外，储层的温度、压力以及孔隙度、渗透率、甚至流体相态等都会发生一定的变化[10]。本文以A油田水驱油藏时移地震应用研究为例，基于Gassmann方程系统开展了岩石物理分析在时移地震应用中的可行性研究、油藏开发时移地震响应规律分析、时移地震油藏参数表征和时移地震综合研究成果解析四个方面的应用研究，并对时移地震技术的应用价值进行了探讨。

2. 时移地震岩石物理分析方法

油藏开发过程实质就是一个流体改变的过程，因此，油藏岩石中孔隙流体变化与地震速度和波阻抗关系的确定是利用地震资料进行油气预测和油藏监测的基础，其基础就是基于多孔介质中的地震波传播理论。

孔隙流体对岩石声学性质的影响有两种方式：1) 孔隙流体会改变岩石的弹性模量和密度，从而改变地震波的传播速度；2) 引起速度频散，即速度对地震波频率的依赖性。解释与流体相关的地震波传播特征变化的理论模型很多，其中最常用的理论模型就是 Gassmann 方程[11]：

$$\frac{K_{sat1}}{K_0 - K_{sat1}} - \frac{K_{fl1}}{\phi(K_0 - K_{fl1})} = \frac{K_{sat2}}{K_0 - K_{sat2}} - \frac{K_{fl2}}{\phi(K_0 - K_{fl2})} \quad (1)$$

$$\mu_{sat1} = \mu_{sat2} \quad (2)$$

式中，为 K_{sat} 饱和岩石的有效体积模量， K_0 为组成岩石的矿物的体积模量， K_{fl} 为孔隙流体的有效体积模量， ϕ 为孔隙度， μ_{sat} 为饱和岩石的有效剪切模量，1 和 2 分别表示为流体替换前后状态。

Gassmann 方程较好地描述单相流体的低频效应，奠定了时移地震流体替换研究的基础。由于地下介质是由充满流体的多孔骨架组成，岩石的地震特性实际上是由骨架基质、孔隙及孔隙中的流体组成，而基质是由形成岩石的各种矿物组成，孔隙流体可能是气体、油、水或者其混合物。因此，应用 Gassmann 方程进行流体替换，首先需要对多矿物组分的骨架基质或多组分的孔隙流体进行等效弹性模量分析。

1) 岩石骨架基质弹性模量

基质体积模量和剪切模量来自组成岩石的矿物模量，利用 Voigh-Reuss-Hill (VRH)平均可以计算出有效 K_m 和 μ_m ：

$$M = \frac{1}{2}(M_V + M_R) = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n c_i M_i + \left(\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{M_i} \right)^{-1} \right) \quad (3)$$

式中 M 是有效颗粒模量(K_m 或 μ_m)， M_V 是 Voigt 平均值， M_R 是 Reuss 平均值。 c_i 和 M_i 分别是第 i 个分量的体积系数和模量。

2) 流体体积模量

利用 Wood 方程可以计算混合流体的体积模量 K_f ：

$$\frac{1}{K_f} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \quad (4)$$

式中， K_w ， K_o 和 K_g 分别是水、油和气体的体积模量， S_w ， S_o 和 S_g 是水、油和气体的含水饱和度，满足 $S_w + S_o + S_g = 1$ 。

3) 密度

饱和岩石的密度 ρ_s 可以表示为：

$$\rho_s = (1 - \phi)\rho_m + \phi\rho_f \quad (5)$$

式中： ρ_m 为岩石骨架密度， ρ_f 是孔隙流体的密度，对于混合流体，它的体积密度可表示为：

$$\rho_f = S_w\rho_w + S_o\rho_o + S_g\rho_g \quad (6)$$

式中 ρ_w ， ρ_o 和 ρ_g 分别是水、油和气体的体积密度。

3. 时移地震岩石物理分析应用

3.1. 时移地震可行性研究

随着油田的开发,我国越来越多的油田进入高含水和高采出阶段,因此剩余油分布预测和老油区调整、挖潜是油田的生命力。国内外的研究与应用已证明:时移地震技术是完善油藏管理和提高采收率的重要技术手段,然而并不是每一个油气田都适合时移地震,时移地震可行性分析是时移地震应用的重要基础。

时移地震可行性研究包括技术和经济两方面的可行性[11],技术上的可行性实质上是研究油气开采过程中油藏变化引起的地震响应变化的可观测性,它又包括岩石物理和地震观测两个方面,它回答什么样的油藏可以利用时移地震进行监测。而经济上的可行性回答什么样的油藏值得使用时移地震。因此,可行性研究事关时移地震的成败,是时移地震研究的关键。

对于 A 油田,储层空间分布上为背斜构造,储层厚度较大、埋深浅、物性好,属于中孔、中高渗储层,岩性为疏松砂岩。油藏流体性质为轻质原油,水驱开发模式。基于 Gassmann 方程对 A 油藏进行流体替换分析时移地震可行性分析,如图 1 所示,其中图 1(a)为流体替换岩石物理参数差异分析,图 1(b)为流体替换地震响应差异分析。如图所示:由于水和轻质原油声学性质差异较大,使得油砂和水砂存在较大的岩石物理弹性参数差异,而这种差异使地震响应较明显,因此,能够用时移地震响应特征刻画油藏开发过程中流体的变化。综合地质因素、油藏条件、岩石物理和地震响应分析,A 油藏具有较好的时移地震适用条件。

3.2. 油藏开发时移地震响应规律

在油藏水驱开采过程中,时移地震响应变化与储层物性参数、油藏流体饱和度以及储层的温度、压力等因素的变化有关[11],其影响规律可以分别基于 Gassmann 方程和 Batzle-wang 方程进行岩石物理分析[5]。

对于 A 油藏,结合地质、油藏和生产动态资料,综合分析影响油田开发时移地震响应的可能因素,包括温度、压力、含水饱和度、孔隙度等参数随油田开发过程中的变化的可能,并基于岩石物理方程对各种因素进行时移地震响应规律分析,如图 2 所示,其中(a)、(c)、(e)分别为地层速度随温度、含水饱和度和孔隙度的变化,(b)、(d)、(f)分别为地层密度随温度、含水饱和度和孔隙度的变化,其中红色数值表示相应的弹性参数值,深蓝色数值为相对变化率。通过分析可知:温度变化对 A 油藏的速度和密度的影响很小,而储层物性和流体变化对油藏弹性参数的影响较大,速度和密度随含水饱和度的增加而增大,随孔隙度的增大而减小。对于压力影响,通过类比具有相似储层特征和流体性质的油田的岩石物理实验结果,速度随压力的变化率约为 10 m/s/MPa ,密度的变化率约为 $2 \text{ kg/cm}^3/\text{MPa}$ 。

由于 A 油藏流体性质为轻质原油,因此,由于 A 油藏岩性为疏松砂岩,埋深较浅,因此物性变化对水驱时移地震的影响应适度考虑,此外,流体和压力变化是引起该油田地层速度和密度变化的主要因素,而温度对时移地震的影响可以忽略不计。

3.3. 时移地震油藏参数表征

岩石物理分析是连接油藏参数(温度、压力、流体、岩性、物性)和地震参数(速度、密度、地震响应)变化的桥梁。基于 Gassmann 方程,通过建立岩石物理模型,开展流体替代分析,针对时移地震的工作需求开展了响应的岩石物理分析工作。

综合地质、油藏参数基于 Gassmann 方程对 A 油藏各个油组进行水驱油流体替换分析,由于油藏流

体性质为轻质原油，因此水驱油引起的地层弹性参数变化比较明显。对于流体替换前后定义流体敏感性参数：

$$FP = \frac{F_w - F_o}{F_w} \quad (7)$$

式中 F 为某岩石物理参数，如速度、密度等参数，下标 w 表示水， o 表示油， FP 值越大表明参数 F 对流体越敏感。

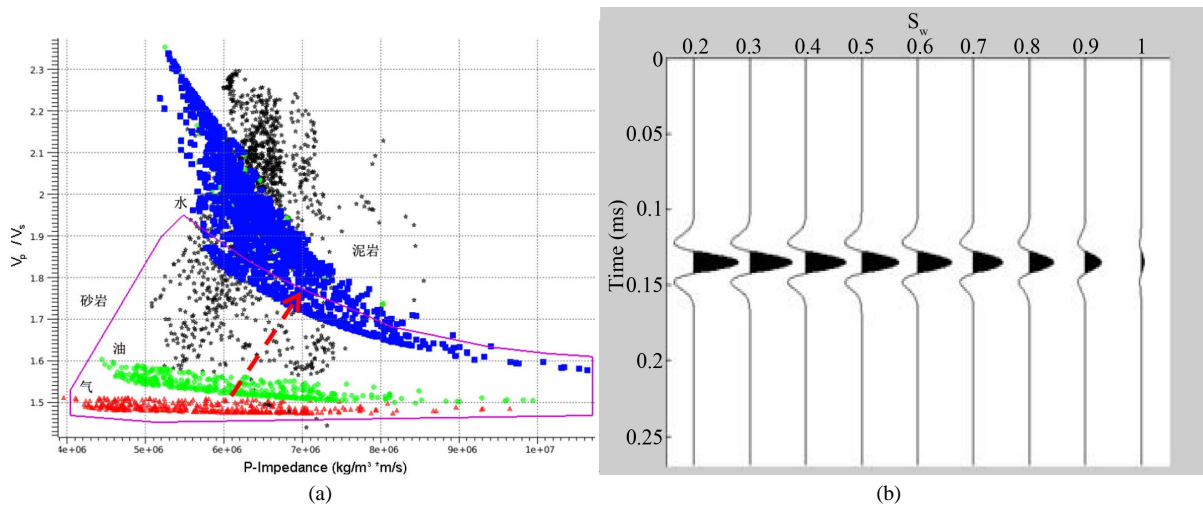
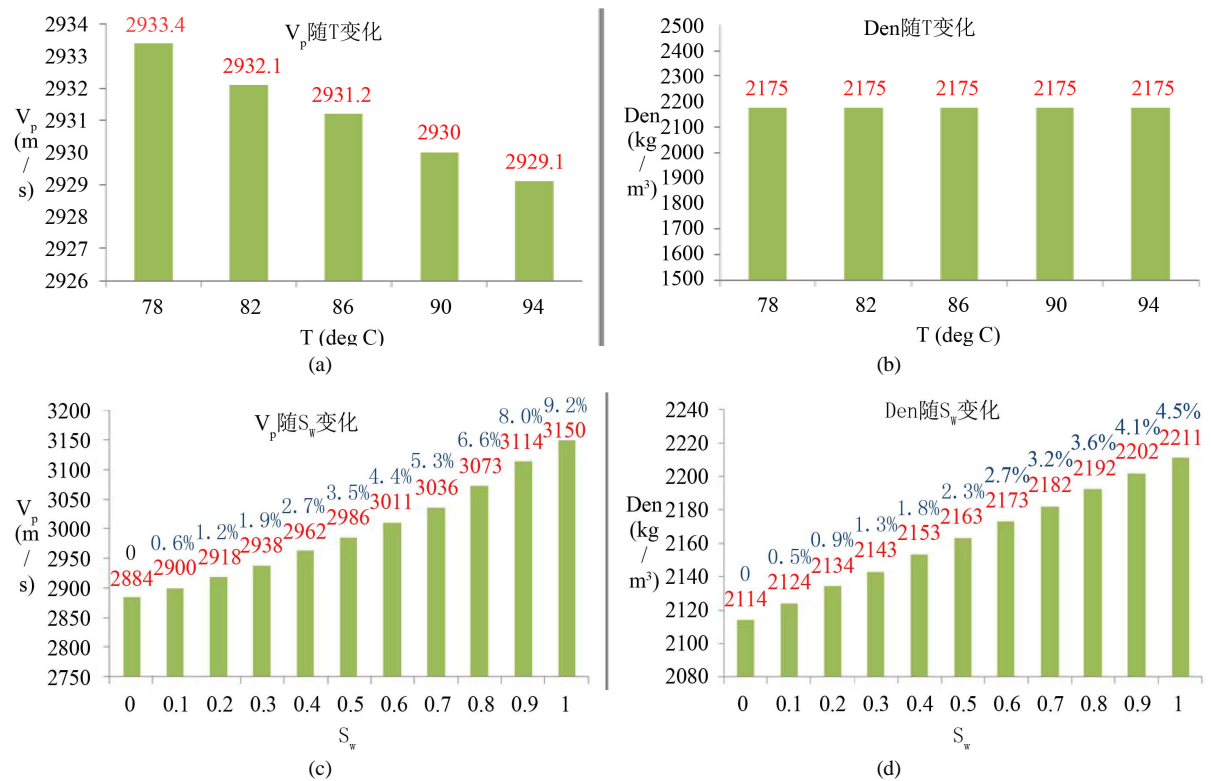


Figure 1. The study on time-lapse seismic feasibility for reservoir A, as to fluid replacement, (a) is rock physical analysis and (b) is seismic response differences analysis

图 1. A 油藏时移地震可行性分析：(a) 为流体替换岩石物理参数分析，(b) 为流体替换地震响应差异分析



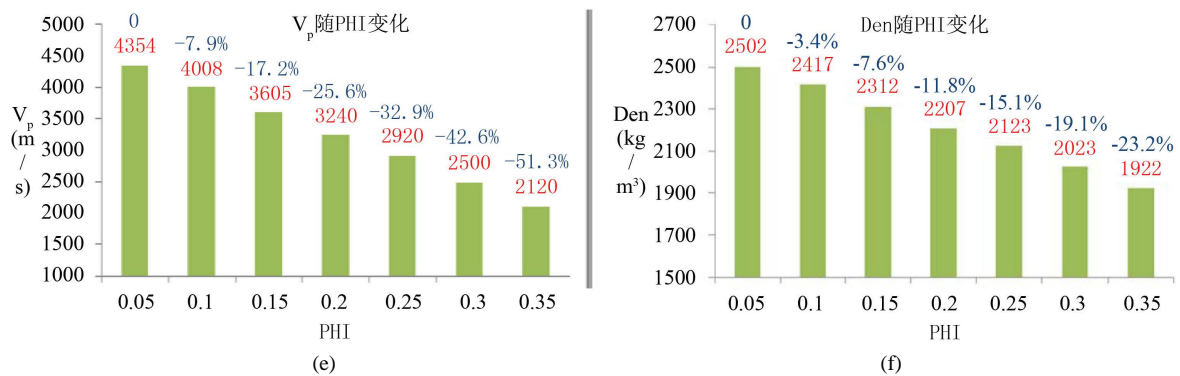


Figure 2. Time-lapse seismic response analysis for reservoir development, and the velocity and density variation versus temperature, water saturation, porosity are depicted in figure (a), (c), (e) and (b), (d), (f) respectively, where red values indicate elastic parameters, and blue values are relative change rate

图 2. 油藏开发时移地震响应规律分析: (a)、(c)、(e)分别为地层速度随温度、含水饱和度、孔隙度的变化, (b)、(d)、(f)分别为地层密度随温度、含水饱和度、孔隙度的变化, 其中红色数值表示弹性参数值, 深蓝色数值为相对变化率

对 A 油藏水驱油岩石物理分析表明, 流体替换敏感弹性参数分析如图 3 所示, 其中水驱油引起的横波速度 V_s 平均流体敏感性为 1.9%, 密度 Den 平均流体敏感性为 4.5%, 纵波速度 V_p 平均流体敏感性为 9.2%, 如图 3(a)所示, 进一步, 我们推导其它弹性参数流体敏感性如图 3(b)所示, 得到的流体敏感性岩石物理参数排序为(从大到小): $I_p^2 - 2.15I_s^2, \lambda - 0.15\mu, \lambda, \lambda/\mu, PR, I_p, V_p/V_s, V_p, Den, V_s$ 其中, λ 和 μ 为拉梅常数, PR 为泊松比, I_p 、 I_s 分别为纵、横波阻抗。

通过上述的流体替换敏感弹性参数分析可知, A 油田具有良好的时移地震岩石物理分析基础, 通过上述的流体敏感性排序可知, $I_p^2 - 2.15I_s^2$ 参数对油藏开发过程中流体的变化最为敏感, 因此, 在 A 油藏的时移地震工作中, 我们将采用时移地震叠前 $I_p^2 - 2.15I_s^2$ 反演进行流体变化的刻画。

3.4. 时移地震研究成果解析

通过 3.2 节油田开发时移地震响应规律可知, 地层压力和流体饱和度变化是影响时移地震响应变化的主要因素, 基于 Gassmann 方程进行正演模拟, 研究分析压力和流体变化时, 储层岩石物理性质变化所导致的地震响应的变化。

根据 A 油藏测井和地质资料, 构建双层模型进行分析, 双层模型能反映出由于层内性质改变所导致的界面对地震的影响变化, 模型参数如图 4 所示, 假定顶层泥岩的岩石物理性质不变, 纵波速度 V_p 为 3210 m/s, 密度 Den 为 2.251 g/cm³, 底层砂岩的原始性质为: 纵波速度 V_p 为 2950 m/s, 密度 Den 为 2.154 g/cm³, 孔隙度 PHI 为 24%, 泥质含量 V_{sh} 为 10%, 含水饱和度 S_w 为 20%, 地层压力 25 MPa, 采用 45 Hz 雷克子波进行合成地震记录, 研究地层压力和流体饱和度变化所引起地震响应的变化。

3.4.1. 压力引起的地震响应的变化

对于压力变化过程中底层砂岩性质变化引起的地震响应变化, 以 25 MPa 为初始地层压力, 按照 1 MPa 为步长逐步改变地层压力到 40 MPa, 使用 45 Hz 的 Ricker 子波合成地震记录。如图 5 所示, 其中图 5(a)为不同地层压力的地震响应, 图 5(b)为以 $P = 25$ MPa 的地震响应进行归一化得到的地震响应随地层压力的变化率。

从图上看, 随着地层压力增大, 有效压力减小, 模型界面的反射振幅逐步变大。这是由于底层砂岩速度比上层盖岩小, 当地层压力增大时, 引起底层砂岩速度减小, 导致模型上下层之间的速度差异变大, 从而导致上下层的波阻抗差异变大, 即界面的反射振幅变大, 当地层压力从 25 MPa 变化到 40 MPa 时, 反射振幅变化率达到 45%。

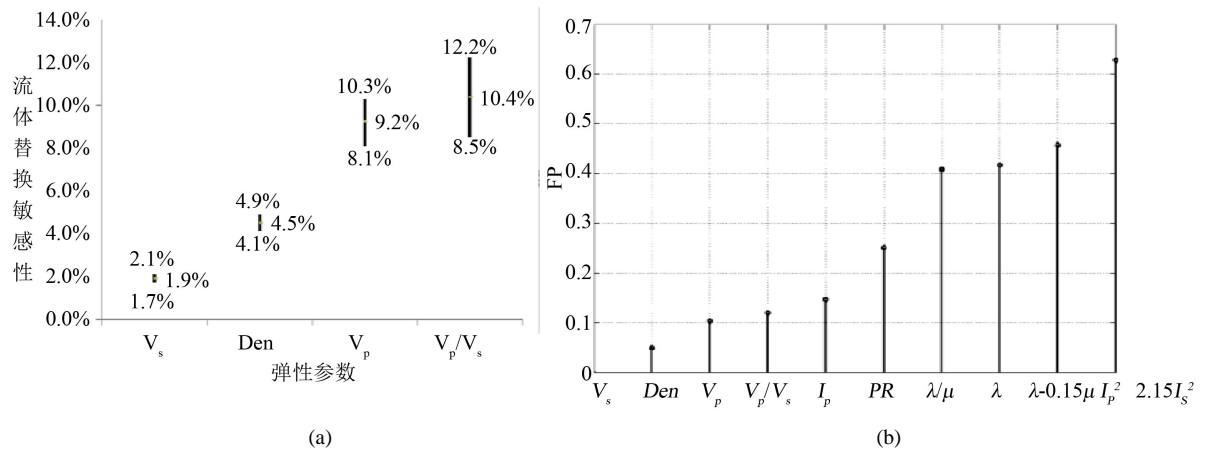


Figure 3. The sensitive elastic parameters analysis for fluid replacement for A reservoir time-lapse seismic, where (a) is the velocity and density variation rate, (b) is the sensitive elastic parameters analysis for water driving oil

图 3. A 油藏时移地震流体替换弹性参数敏感性分析, 其中(a)为水驱油速度、密度变化率, (b)为水驱油岩石物理参数敏感性分析

$V_p = 3210 \text{ m/s}$ Den = 2.251 g/cc	泥岩
$V_p = 2950 \text{ m/s}$ Dcn = 2.154 g/m ³ PHI = 24% Vsh = 10% S _w = 20 %	砂岩

Figure 4. Two layers medium model

图 4. 双层介质模型

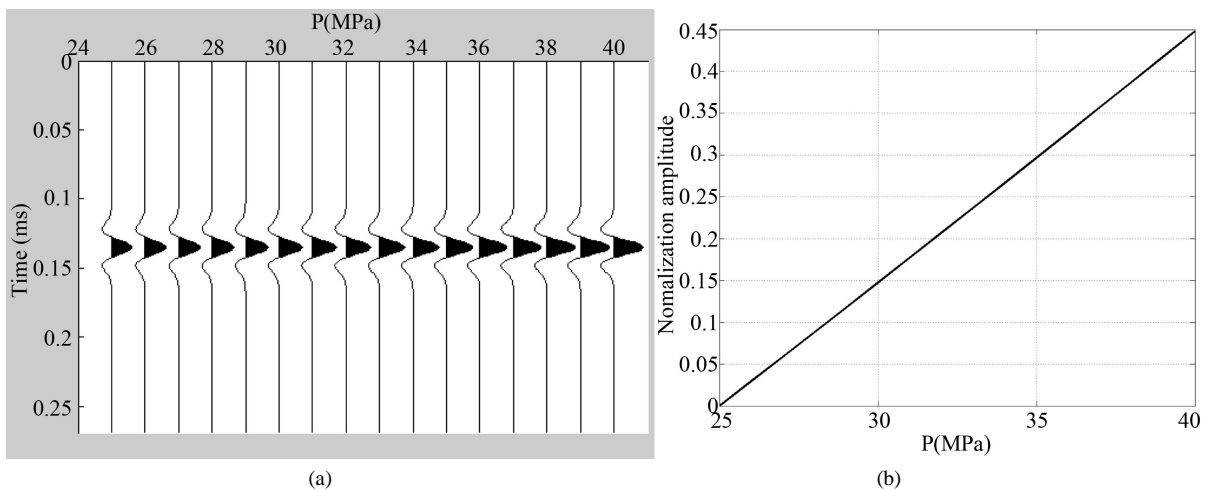


Figure 5. The seismic response analysis versus pressure variation, which includes the seismic response variation and variation rate analysis versus pressure depicted in figure (a) and (b), normalized by the seismic response of pressure value of 25 MPa

图 5. 地层压力变化的地震响应分析: (a)为不同地层压力的地震响应, (b)为地震响应随地层压力的变化率(以 P = 25 MPa 的地震响应进行归一化)

3.4.2. 含水饱和度引起的地震响应的变化

对于含水饱和度变化过程中底层砂岩性质变化引起地震响应变化，以 20% 为初始地层含水饱和度，以 10% 变化率为步长逐步改变含水饱和度到 100%，采用流体替换方法，计算纵波速度的变化，然后使用 45 Hz 的 Ricker 子波合成响应的地震记录，如图 6 所示，其中图 6(a) 为不同含水饱和度的地震响应，图 6(b) 为以 $S_w = 0.2$ 的地震响应进行归一化得到的地震响应随含水饱和度的变化率。

从图中可见，随着含水饱和度增加，模型界面的振幅逐步变小，这是由于底层砂岩速度比上层泥岩小，当含水饱和度增加时，引起底层砂岩速度增加，导致模型上下层之间的速度差异变小，从而导致上下层的波阻抗差异变小，即界面的反射振幅变小，当含水饱和度从 20% 变化到 100% 时，反射振幅变化率达到 94%。

4. 结论与认识

时移地震技术是完善油藏管理和提高采收率的一项技术手段，是老油田调整、挖潜的重要技术之一。时移地震一致性采集和匹配处理是该技术取得成功应用的前提，而时移地震技术的综合应用是该项技术生命力。岩石物理分析是油藏开发时移地震监测的基础，它的应用贯穿了时移地震前期的可行性研究和中后期的时移地震技术的综合应用研究，通过本文 A 油藏水驱油时移地震应用的岩石物理分析技术的研究，得到如下认识：

- 1) 时移地震油藏监测研究具有投资大和风险高的特点，因此，时移地震可行性研究是时移地震应用的重要基础，其可行性评价分为地质条件、油藏条件、岩石物理条件、地震条件和经济条件，其重点是油藏开发过程足以引起油藏声学性质和地震响应特征发生显著变化，如 A 油藏构造相对简单，储层厚度较大、物性较好，水驱轻质原油流体声学性质差异较大，这些先天优势为时移地震技术的成功应用奠定了良好的基础。
- 2) 影响油田开发时移地震监测的因素很多，除了本文研究的流体替换、温度、孔隙压力、孔隙度变化外，孔隙流体性质变化(如地层水矿化度、活油 API、原油原始气油比等)也可能引起时移地震响应变化，而且开发的不同时期，影响时移地震监测的主要因素也可能会发生变化，对于 A 油藏当前生产状态，压力和流体性质变化是主要影响因素。

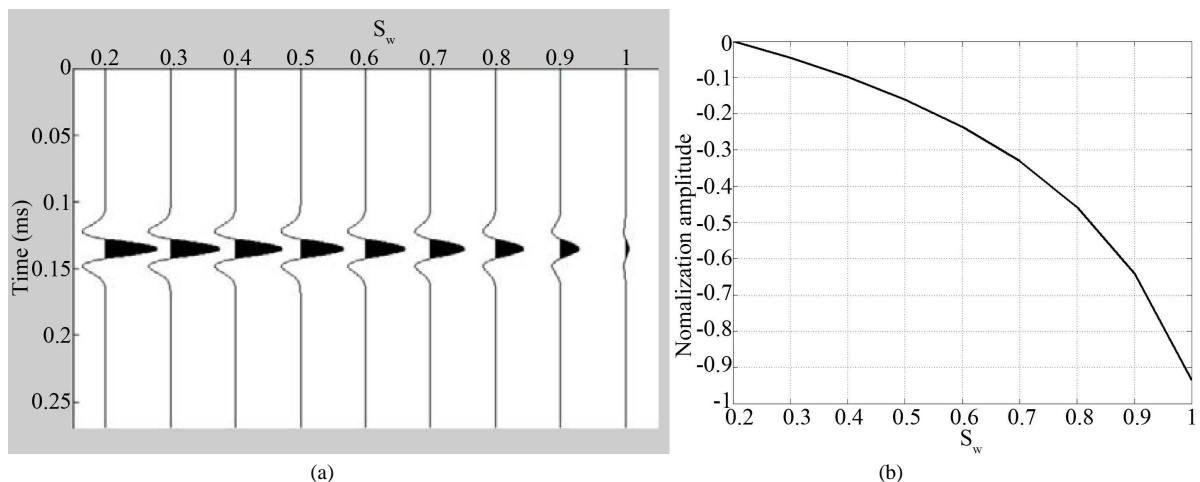


Figure 6. The seismic response analysis versus water saturation variation, which includes the seismic response variation and variation rate analysis versus saturation depicted in figure (a) and (b), normalized by the seismic response of water saturation value of 0.2

图 6. 含水饱和度变化的地震响应分析：(a) 为不同含水饱和度的地震响应，(b) 为地震响应随含水饱和度的变化率(以 $S_w = 0.2$ 的地震响应进行归一化)

3) 油藏开发过程岩石物理性质变化是时移地震差异数据解释的基础, 优选对水驱油流体变化最敏感的弹性参数进行时移地震反演, 有利于时移地震的综合解释。此外, 对于 A 油藏, 地层压力增加和水驱油流体变化对地层的速度和密度的影响是负叠加的, 因此, 利用时移地震差异数据体进行流体解释要考虑地层压力变化的影响。

基金项目

中国海洋石油有限公司综合科研项目“海上重复性时移地震技术及应用研究(CNOOC-KJ125 ZDXM 06 LTD-10-KFSC-14)”项目资助。

参考文献 (References)

- [1] Gregory, A.R. (1976) Fluid Saturation Effects on Dynamic Elastic Properties of Sedimentary Rocks. *Geophysics*, **41**, 895-921. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440671>
- [2] Clark, V.A. (1992) The Properties of Oil under *In-Situ* Conditions and Its Effect on the Seismic Properties of Rocks. *Geophysics*, **57**, 894-901. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443302>
- [3] Wang, Z. and Nur, A. (1987) Velocities in Hydrocarbons and Hydrocarbon-Saturated Rocks and Sands. *Expanded Abstracts of 57th Annual Internat SEG Mtg*, 374-379. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1891881>
- [4] 史譔, 沈文略, 杨东全. 岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 138-142.
- [5] Batzle, M. and Wang, Z. (1992) Seismic Properties of Pore Fluids. *Geophysics*, **57**, 1396-1408. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443207>
- [6] Wang, Z. (2001) Fundamentals of Seismic Rock Physics. *Geophysics*, **66**, 398-412. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444931>
- [7] Wang, Z.J. (1997) Feasibility of Time Lapse Seismic Reservoir Monitoring: The Physical Basis. *The Leading Edge*, **16**, 1327-1329. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1437796>
- [8] Batzle, M., Christiansen, R. and Han, D.H. (1998) Reservoir Recovery Processes and Geophysics. *The Leading Edge*, **17**, 1444-1447. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1437872>
- [9] 甘利灯, 姚逢昌, 邹才能, 等. 水驱四维地震技术可行性研究及其盲区[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(1): 24-29.
- [10] 云美厚, 丁伟, 杨长春. 油藏水驱开采时移地震监测岩石物理基础测量[J]. 地球物理学报, 2006, 49(63): 1813-1818.
- [11] 甘利灯. 四维地震技术及其在水驱油藏监测中的应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2002.