

# Quantitative Interpretation of Time-Lapse Seismic Based on Rock Physics Template

Yunfeng Gao, Zongjun Wang, Xianwen Zhang, Wentao Cai, Hongchao Dong

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

Received: Nov. 27<sup>th</sup>, 2016; accepted: Dec. 13<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 16<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors 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

In this paper, a technique of rock physics template construction is proposed and applied in time-lapse seismic feasibility analysis and quantitative prediction of remaining oil distribution. Based on well data, the Hertz-Mindlin contact model and the Hashin-Shtrikman lower bound model, forward modeling with different parameters such as porosity, shale content, fluid properties, oil saturation, and temperature and pore pressure was carried out to get data for rock physics template. With the rock physics template matched with geological features, we can get quantitative regulation between elastic parameters and oil saturation under various conditions, which can be used for time-lapse seismic interpretation. The practical application shows that the time-lapse seismic prediction is in good agreement with the well drilling results in S oilfield.

## Keywords

Rock Physics Template, Time-Lapse Seismic, Prediction of Remaining Oil, Quantitative Interpretation

## 岩石物理模板在时移地震定量研究中的应用

高云峰, 王宗俊, 张显文, 蔡文涛, 董洪超

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

收稿日期: 2016年11月27日; 录用日期: 2016年12月13日; 发布日期: 2016年12月16日

## 摘要

针对时移地震定量研究难题,提出了一套岩石物理模板构建技术,并应用于时移地震可行性分析和剩余油分布定量预测。该技术是在井资料的约束下,通过Hertz-Mindlin接触模型结合Hashin-Shtrikman界限模型得到与地质特征匹配的岩石物理模板,并通过改变孔隙度、泥质含量、流体性质、温度和孔隙压力等参数模拟各种条件下含油饱和度变化后各种弹性参数的变化规律,进而用于时移地震定量研究。S油田的实际应用表明该技术的预测结果与实钻结果有较高的吻合程度。

## 关键词

岩石物理模板, 时移地震, 剩余油预测, 定量解释

## 1. 引言

时移地震是利用不同时期采集地震资料之间的差异来检测油气藏开发过程中流体场、压力场和储层物性的变化,进而指导油气田的管理和开发调整,以提高油气田采收率和开发效益的一项技术[1] [2] [3]。随着油气开发的不断深入,国内外对于油田采收率提高和老油区剩余油分布预测问题越来越重视,时移地震油藏监测技术也得到了广泛关注和快速发展[4] [5] [6],但在定量化研究方面仍然难以满足实际生产的要求。其主要原因在于地震信息与地下储层参数不是一一对应的,它们之间的对应关系因受岩性、物性、流体、温度和压力等各种因素影响而呈现复杂性和多解性[7] [8] [9] [10]。

岩石物理是连接地震属性与储层参数的重要桥梁,也是用地震资料进行储层表征和油气检测的基础[11] [12]。岩石物理模板是2003年由Odegaard和Avseth [13]最先提出,目前已逐渐发展成为储层和流体参数地震解释的重要工具[14] [15] [16]。岩石物理模板构建技术在储层参数反演及定量预测中已得到了广泛应用,但在时移地震定量研究中的应用报道较少。通过地震岩石物理分析,构建油藏特征参数(如孔隙度、流体饱和度、温度和压力等)与时移地震敏感参数之间变化关系图版,是实现时移地震定量研究的根本途径。本文利用S油田的实际资料,系统开展了岩石物理模板构建、时移地震可行性分析和剩余油饱和度定量解释,研究成果有效指导了研究区生产井井位优化分析工作。

## 2. 岩石物理模板技术原理及流程

岩石物理模板是以地质信息为约束的岩石物理模型,基于Gassmann方程进行流体替换构建岩石物理模板,再根据研究区的地质条件进行模型校准应用于地震数据上。岩石物理模板技术的应用效果取决于合理的模型选取和正确的储层地质信息。

目前常用的岩石物理模板是纵波阻抗和纵横波速度比的交会图,这两个弹性参数的交会分析对岩性和流体性质有较好的指示作用。其他参数的岩石物理模板交会组合有横波阻抗和纵波阻抗、弹性阻抗和纵波阻抗以及拉梅常数和剪切模量。

在实际应用中,岩石物理模板构建主要包括以下4个步骤(图1)。

- 1) 在给定岩石孔隙度和压力条件下,利用Hertz-Mindlin等效介质理论计算出干岩石模量。
- 2) 利用Hashin-Shtrikman岩石边界模型插值计算出随孔隙度变化的干岩石模量。
- 3) 利用Gassmann流体替换理论,计算出含流体后岩石模量。

4) 计算出岩石纵波速度、横波速度和密度等参数,进而绘制出每一种岩性的敏感参数交会图,通常模板横坐标为纵波阻抗,纵坐标为纵横波速度比或其它弹性参数组合等。

利用上述步骤得到的最终模板如图 2 所示，包括了储层的岩性、物性和流体信息，其中三种岩性的压实趋势线分别为含水砂岩趋势线，泥岩趋势线和灰岩趋势线，模板中趋势线的延伸方向表示各岩性纵波阻抗和纵横波速度比随孔隙度(压实)的变化规律，同时也刻画了砂岩纵波阻抗和纵横波速度比随含气饱和度的变化规律。此外，该模板也可以得到纵波阻抗和纵横波速度比随泥质含量的变化规律，当砂岩含

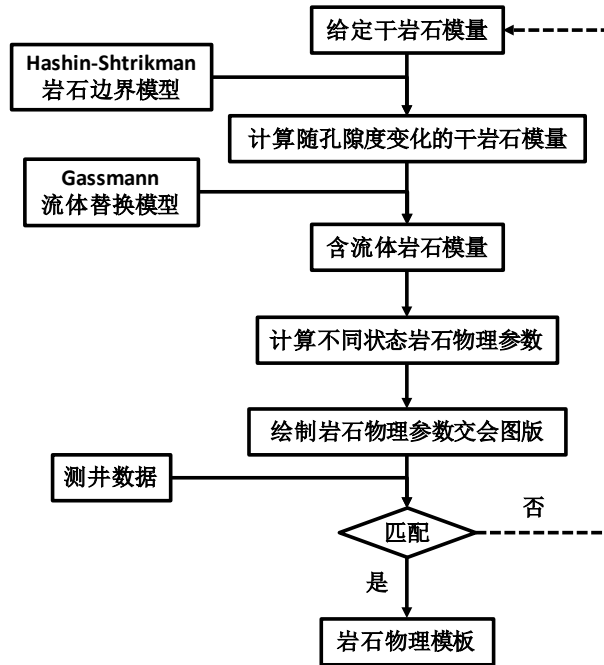


Figure 1. Construction workflow of rock physics template  
图 1. 岩石物理模板构建流程

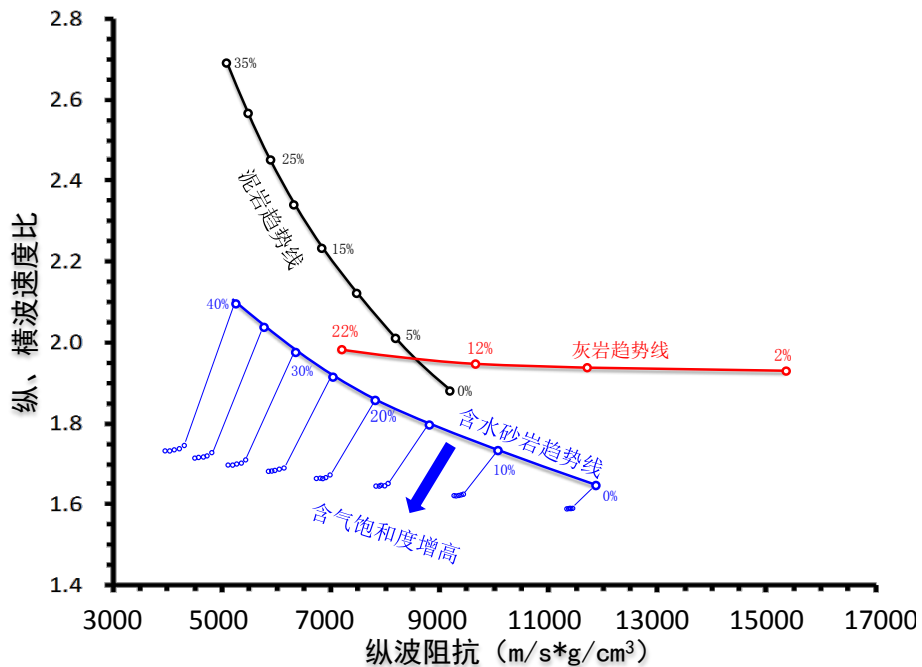


Figure 2. Schematic diagram of rock physics template  
图 2. 岩石物理模板结构示意图

灰质时，其纵波阻抗和纵横波速度比的数值将靠近灰岩线。在应用中，把实际地震数据投影在模板上，基于数据的投影位置，可以圈定出岩性、物性以及流体信息，进而指导定量解释。

### 3. 岩石物理模板在 S 油田时移地震中的应用

#### 3.1. 油田概况

S 油田位于珠江口盆地北部坳陷带，是一个典型的逆牵引背斜构造。含油层段分布在上第三系珠江组，埋藏深度在-2005~-2783 m。储层为辫状河三角洲平原—三角洲前缘沉积砂岩。钻井揭示储层厚度为 3.4~33 m。储层测井单井平均孔隙度主要分布在 15%~25%，渗透率多分布在 300~1000 md，为中~高孔隙度，中~高渗透率储层。

该油田 1997 年投产，利用天然能量开发，先后部署了 17 口开发井。目前油田逐渐进入开发中后期调整阶段，根据剩余油预测和调整方案研究的需要，开展了时移地震技术应用研究。

#### 3.2. 岩石物理模板构建

根据测井和测试资料分析结果，研究区储层和流体物理参数具体如下：储层纵波速度：3160~4430 m/s，横波速度：1680~2710 m/s，密度：2.12~2.47 g/cm<sup>3</sup>。测井解释含油饱和度为 27.6%~86%；地层原油粘度：1.63~3.02 mPa·s；原始气油比：1.099~1.407 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>；地层原油密度：0.772~0.819 g/cm<sup>3</sup>；饱和压力为 0.45~0.63 MPa；地饱压差：23.41~25.73 MPa。地下原油具有粘度低、比重低、饱和压力低、溶解气油比低的特点。油层温度：100.87℃~107.55℃；油层压力 25.55~28.05 Mpa。根据油藏温、压条件，以及储层和流体测井参数，计算得到储层干岩石体积模量 16.57 Gpa，储层流体体积模量 1.43 GPa，水体积模量 2.59 Gpa。

利用研究区上述岩石物理参数，根据岩石物理模板分析技术流程，构建了研究区目的层段岩石物理模板(图 3)，其中横坐标为纵波阻抗( $Z_p$ )，纵坐标为拉梅常数  $\times$  密度( $\lambda \times \rho$ )，色标为孔隙度。从图中可以看出随着孔隙度的增大，纵波阻抗和拉梅常数  $\times$  密度均明显降低；随含油饱和度的降低，纵波阻抗和拉梅常数  $\times$  密度也都明显降低。该模板合理地反映了轻质油藏地球物理特征，同时建立了油藏地质参数(储层孔隙度、含油饱和度)与储层地震属性(纵波阻抗和拉梅常数  $\times$  密度)之间的定量模型，为时移地震可行性分析和剩余油分布定量预测提供了参考和量版。

#### 3.3. 岩石物理模板应用分析

##### 1) 时移地震可行性分析

时移地震可行性分析的主要内容之一就是根据目标油田的油藏特征和开发情况，通过地震正演模拟，分析地震响应的可监测性。通常原油的流体性质和岩石孔隙度是影响油水替换后时移地震响应的关键因素。根据测井和油藏开发生产数据，可以确定储层孔隙度参数以及含油饱和度变化情况，再利用岩石物理模板就可以快速计算出纵波阻抗和纵横波速度比等流体地震敏感参数的变化量，进而确定某一时间点时移地震的可行性。

根据 S 油田储层和流体性质，以及实际测试资料，设定原始含油饱和度是 80%，当油层全部水侵后，残余油饱和度是 10%，根据前面的岩石物理模板，可以确定不同孔隙度储层条件下的纵波阻抗、纵横波速度比和拉梅常数  $\times$  密度等参数的相对变化率(图 4)。可见，当孔隙度大于 15%时，纵波阻抗的变化幅度即可达到工业界公认的时移地震可行性的门槛值(3%)。而研究区已有测井解释孔隙度均大于 15%，因此具有时移地震可行性。拉梅常数  $\times$  密度的相对变化率最大，即对流体变化最为敏感。

##### 2) 时移地震定量解释

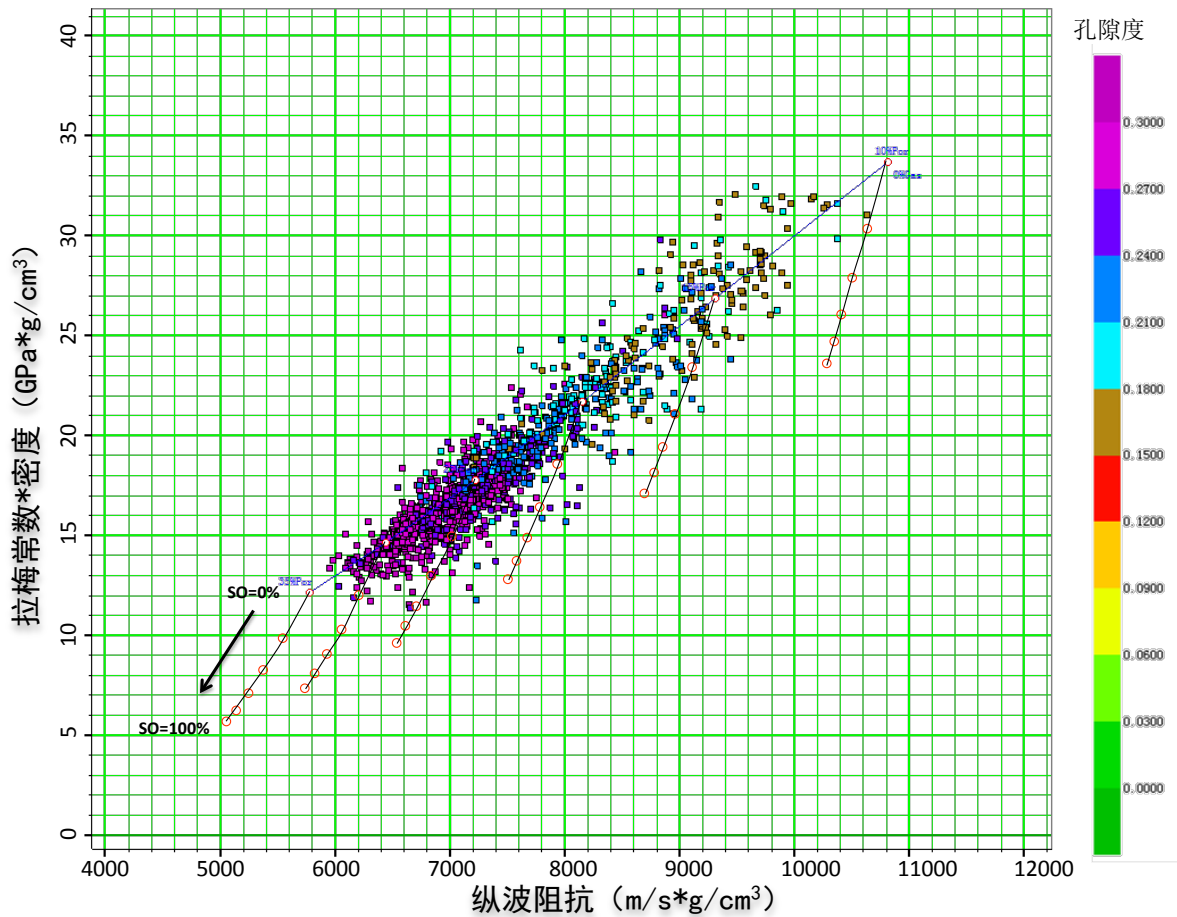


Figure 3. Rock physics template for the target reservoir in S oilfield  
 图 3. S 油田目的层段储层岩石物理模板

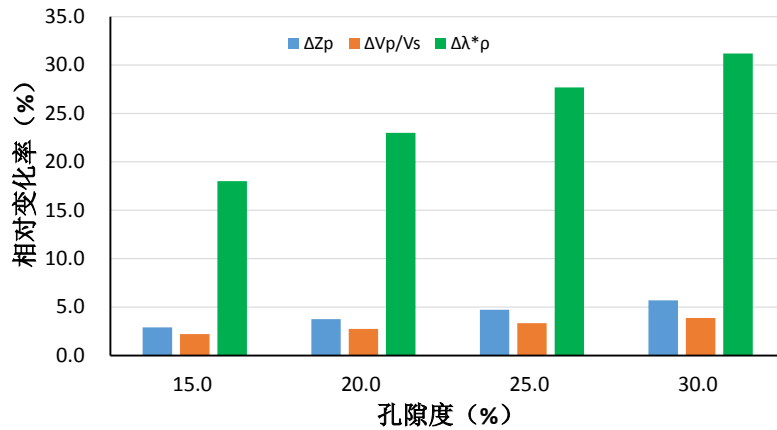


Figure 4. Elastic parameters variation in water flood reservoir with different porosity. In the figure,  $\Delta Z_p$ ,  $\Delta V_p/V_s$ ,  $\Delta \lambda \times \rho$  are relative variation ratio of p-wave impedance, p-wave to s-wave velocity ratio and lame constant  $\times$  density respectively

图 4. 不同孔隙度条件下油层水侵后引起的弹性参数变化对比图。图中  $\Delta Z_p$ ,  $\Delta V_p/V_s$ ,  $\Delta \lambda \times \rho$  分别为纵波阻抗、纵横波速度比和拉梅常数  $\times$  密度相对变化率

在研究过程中,通过反演得到了各目标层的时移地震纵波阻抗和拉梅常数  $\times$  密度等流体敏感属性及差异成果数据。图 5 和图 6 为 H11 层各时移地震反演参数差异平面分布图,其中黄-红色区域为时移地震差异高值区,即时移地震响应变化明显的区域。从平面展布特征来看,黄-红色区域与开发井的分布,以及储层沉积方向(由北西向南东)具有较好的一致性,是符合油藏地质和开发规律的。因此,可以认为其有效反映了油藏流体驱替方向和范围。在此基础上,利用岩石物理模板对时移地震差异进行了定量解释,得到了含油饱和度变化预测结果(图 7),为调整方案研究和开发井井位设计提供了有效的依据。

调整方案实施后,根据 10 口开发井测井解释结果,6 个油藏单元,时移地震剩余油饱和度预测结果吻合率达到了 85%。

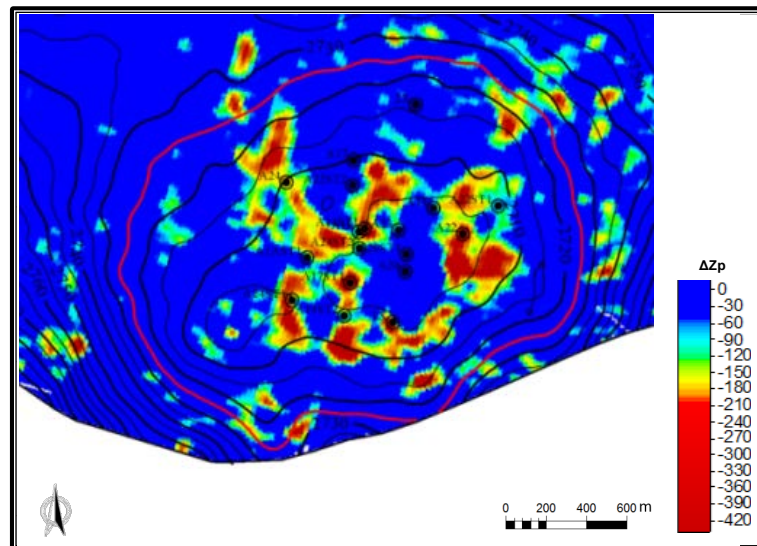


Figure 5. P-impedance difference map of the layer H11 based on time-lapse seismic inversion

图 5. H11 层时移地震反演纵波阻抗差异平面分布图

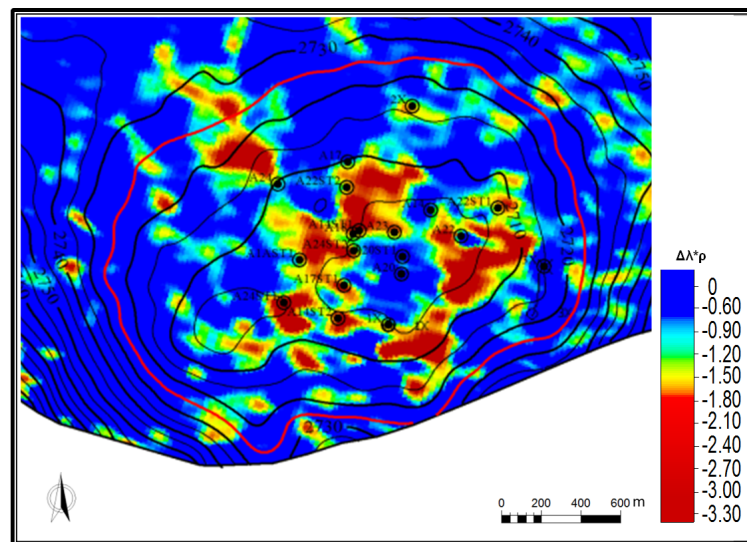
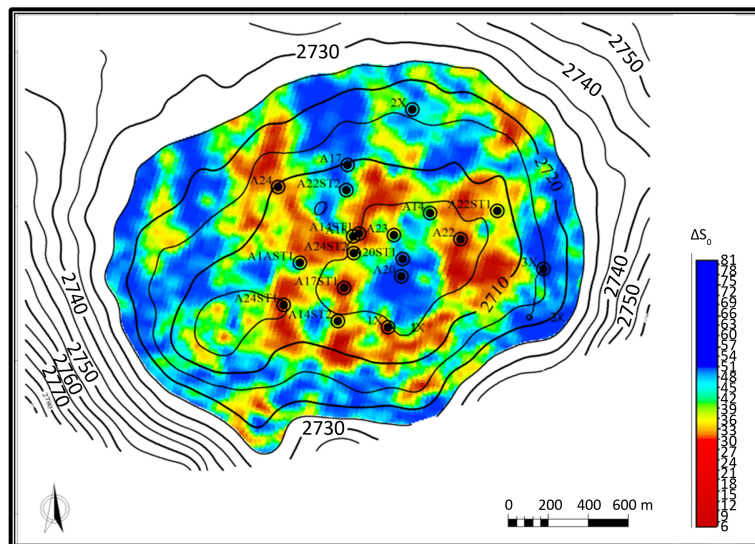


Figure 6. Lamé constant  $\times$  density difference map of the layer H11 based on time-lapse seismic inversion

图 6. H11 层时移地震反演拉梅常数  $\times$  密度差异平面分布图



**Figure 7.** Prediction oil saturation map of the layer H11 based on time-lapse seismic inversion

**图 7.** H11 层时移地震预测含油饱和度平面分布图

#### 4. 结论与建议

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。本文基于 Gassmann 方程给出了岩石物理模板构建流程，进一步针对 S 油田的地质、油藏特征，构建形成了包括岩性、物性和流体特征的岩石物理模板，开展了油田时移地震可行性研究，结果表明纵波阻抗和拉梅常数  $\times$  密度等参数能够反映油藏开发流体变化，进而基于时移地震反演弹性参数差异实现了含油饱和度的平面预测，研究成果为油田的调整方案研究和开发井井位设计提供了有效的支撑。

#### 基金项目

中国海洋石油总公司重大专项“海上非重复性时移地震技术及应用研究”项目资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] 周家雄, 谢玉洪, 陈志宏, 等. 时移地震在中国海上气田的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(2): 285-292.
- [2] 周水生, 刘洪, 王冲, 等. 基于岩石物理实验的时移地震研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1739-1748.
- [3] 郭念民, 吴国忱. 非重复采集时移地震正演模拟及可行性分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 232-245.
- [4] 李景叶, 陈小宏. 时移地震油藏监测可行性分析评价技术[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 125-132.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 马淑芳, 韩大匡, 甘利灯, 等. 地震岩石物理模型综述[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 460-471.
- [8] Gregory, A.R. (1976) Fluid Saturation Effects on Dynamic Elastic Properties of Sedimentary Rocks. *Geophysics*, **41**, 895-921. <https://doi.org/10.1190/1.1440671>
- [9] 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. <https://doi.org/10.1190/1.1443302>
- [10] 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. 地球物理学报, 2003, 46(1): 138-142.

- [11] Batzle, M. and Wang, Z. (1992) Seismic Properties of Pore Fluids. *Geophysics*, **57**, 1396-1408. <https://doi.org/10.1190/1.1443207>
- [12] Wang, Z. (2001) Fundamentals of Seismic Rock Physics. *Geophysics*, **66**, 398-412. <https://doi.org/10.1190/1.1444931>
- [13] Odegaard, E. and Avseth, P. (2004) Well Log and Seismic Data Analysis Using Rock Physics Templates. *First Break*, No. 23, 37-43.
- [14] 张广智, 陈娇娇, 陈怀震, 张金强, 印兴耀. 基于岩石物理模板的碳酸盐岩含气储层定量解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 630-638.
- [15] Nabajyoti Boruah 著, 董娜, 编译. 用测井岩石物理模板分析法识别岩性及流体[J]. 油气地球物理, 2014, 12(4): 70-73.
- [16] 张万龙, 孙赞东, 贺薪蔚, 等. 地震岩石物理模板应用中的两个关键问题[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2324-2329.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)