

# The Application of Shear-Wave Calculation in Xu-White Model in Block 18 of Ecuador

Kun Yuan<sup>1</sup>, Xinxin Fang<sup>2</sup>, Tao Wen<sup>3</sup>, Fei Yang<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing

<sup>3</sup>Exploration Company, SINOPEC, Beijing

<sup>4</sup>School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: \*randyang@126.com

Received: Jun. 17<sup>th</sup>, 2016; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2016; published: Feb. 15<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In the pre-stack elastic impedance inversion technology, in addition to the need for longitudinal wave transit time, density logging data, accurate S-wave velocity data were also needed. However, the cost of shear wave logging collection was higher, and it was less used for measurement in actual production, and sometimes the S-wave logs were usually not accurate enough to reflect the fluid properties (containing oil and gas) after the measured S-wave was influenced by environment. Therefore, to obtain elastic parameters that could reflect accurately the lithology and property of oil and gas containing, the processing result of longitudinal wave transit time and other logging data was used to obtain the shear-wave by using the improved method based on Xu-white Model, the obtained shear wave was used for pre-stack elastic impedance reversion and predicting the lithologic development and fluid distribution. By Block 18 in Ecuador for example, the above method is used for calculation S-wave curve for the implementation of fluid prediction in the sand bodies with strong heterogeneity, and high industrial oil flow is obtained in the well locations designed with the predicted results.

## Keywords

Xu-White Model, S-Wave Velocity Calculation, Elastic Parameters, Ecuador

---

---

\*通信作者。

# 基于 Xu-White 模型的横波计算在厄瓜多尔 18 区块的应用

苑坤<sup>1</sup>, 方欣欣<sup>2</sup>, 闻涛<sup>3</sup>, 杨飞<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>中国地质调查局油气资源调查中心, 北京

<sup>2</sup>中国地质科学院地质力学研究所, 北京

<sup>3</sup>中石化勘探分公司, 北京

<sup>4</sup>长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉

作者简介: 苑坤(1985-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事油气资源评价工作。

Email: \*randyang@126.com

收稿日期: 2016年6月17日; 录用日期: 2016年11月12日; 发布日期: 2017年2月15日

## 摘要

叠前弹性阻抗反演中, 除需要纵波时差、密度测井资料外, 还需要用到可靠的横波时差。由于横波测井采集成本较高, 在实际生产中测量较少, 且部分实测横波受环境影响后对流体性质(含油气性)的反映并不理想。因此, 为得到能够准确反映岩性及含油气性的弹性参数, 利用纵波时差及其他测井资料处理成果, 使用基于 Xu-White 模型改进的方法计算横波, 并应用于叠前弹性阻抗反演, 以预测岩性发育及流体分布情况。以厄瓜多尔 18 区块为例, 应用上述方法计算横波曲线, 实现了在强非均质性砂体中的流体预测, 且根据预测结果所设计的井位获得了高产工业油流。

## 关键词

Xu-White 模型, 横波计算, 弹性参数, 厄瓜多尔

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University 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

## 1. 引言

随着油气勘探的不断深入, 对于薄层砂体预测的精度要求逐步提高, 以往的常规储层反演方法已无法满足目前勘探开发的需求。叠前弹性阻抗反演以其丰富的地震信息、对薄层砂体及其流体性质的有效识别等优势, 得到广泛应用。然而, 横波速度作为沟通岩石物性和地震波反射特征的桥梁, 是叠前反演能否准确反映地下情况的关键要素。

对于目前的测井技术而言, 横波测井成本仍然居高不下, 多数高成熟开发区块中, 只有个别井测有横波资料; 且横波测量受钻筒环境影响较大, 受影响资料往往无法准确反映地下流体性质。因此, 利用常规测井曲线通过优势算法进行横波计算, 对储层预测及油气检测有重要意义[1] [2] [3]。

## 2. 原理与方法

作为岩石物理研究的重要参数, 横波速度的计算方法前人已做过广泛研究[4] [5] [6], 大体分为经验

公式法和岩石物理理论模拟法两大类。经验公式法是基于纵波速度的一种推导方法,通过拟合纵波速度、密度、泥质含量、含水饱和度、孔隙度等参数的关系来计算横波速度[7] [8] [9]。岩石物理理论模拟法是基于岩石物理参数的一种计算方法,通过寻找岩石物理参数与横波速度之间的关系,结合其他常规测井曲线进行横波预测。比较成熟的方法有两类:基于 Gassmann 公式的横波速度预测方法[10] [11]和基于 Xu-White 模型的横波速度预测方法[12] [13] [14]。

该次研究计算横波所用的方法,融合了经验公式法和岩石物理理论模拟法,是在 Kuster-Toksoz 方程和 Gassmann 方程基础上,结合 Xu-White 模型建立的一种方法,用于预测砂泥岩地层的横波速度。所用模型将常规储层的地层结构进行简化,假设地层由砂、泥岩两种岩性构成,且砂岩和泥岩均由骨架和孔隙组成,砂岩孔隙的纵横波速度比大于泥岩;若两块岩石孔隙发育情况相同,若其中一块的砂岩孔隙较为发育,那么该岩石骨架的纵波弹性模量就大于另外一块。

上述方法计算横波速度的流程主要为:

- 1) 建立符合井情况的流体置换 Xu-White 模型,对 Xu-White 模型作一定简化,将扁率这一实际难以测量的值设定为经验常数;
- 2) 使用常规测井曲线计算单井的泥质含量、孔隙度、含水饱和度等(由于基于流体置换的 Xu-White 模型主要为两相介质的描述,因此泥质含量、孔隙度等是将岩石划分为两相介质的重要参数);
- 3) 使用钻遇地层岩石的砂、泥岩的孔隙纵横比,计算体积模量和切变模量;
- 4) 应用 Gassmann 方程和孔隙流体的性质计算出饱含流体岩石的体积模量和切变模量,并结合密度资料,计算出岩石的纵波速度和横波速度。

在实际计算中,大多数井都测有纵波速度资料,因此可通过实测的纵波速度来校正计算所得的纵波速度,反复迭代,直到预测结果满意为止。

### 3. 实例应用分析

在油田生产开发中,不同地区所对应的地质情况和岩石物理特性各不相同,因此在应用基于 Xu-White 模型的方法进行横波预测时要根据地区的实际情况,对计算过程中的关键参数进行调整。

Napo 组作为厄瓜多尔 18 区块(Oriente 盆地南部)的主要储层,发育潮坪-深水陆棚沉积环境,Napo 组砂体主要富集于潮汐水道相和水下浅滩相,埋深约 3260 m,其中有 30 余口井钻遇,揭示砂体厚度约 50~90 m,砂体在部分井上表现为薄互层正韵律,部分井表现为指状砂,具横向变化快的特点[15] [16] [17]。由于潮汐水道相砂体分选不均匀,孔隙度多集中于 15%~20%,渗透率平均约 500 mD;水下浅滩相砂体储层物性较差,孔隙度约 10%~15%,渗透率平均约 7 mD。区内主要发育岩性地层圈闭和低幅背斜为主的构造圈闭,其中又以岩性地层圈闭为主要目标圈闭类型,常规的地震属性分析及叠后波阻抗反演难以对其进行有效识别和预测。笔者利用基于 Xu-White 模型的横波计算方法,使用叠前纵横波联合反演技术,对储层展布进行了预测,经验证,钻后砂体展布与钻前预测相符合。

在横波计算过程中,泥质含量、含水饱和度和孔隙度曲线的质量非常重要。由于工作区已进入开发阶段,常规测井曲线资料丰富,通过与录井资料对比,容易求得准确的泥质含量曲线。但是,若纯泥岩段存在直线段,则泥质含量曲线表现为方波化,方波化的泥质含量曲线会使计算出的横波速度方波化,影响曲线质量,因此横波速度计算最好针对储层段进行。在泥质含量曲线确定的基础上,利用孔隙度资料进一步修正岩石的弹性参数,使其在储层段表现出不同的响应特征。对于矿物较为单一的情况,泥质不发育地区(如仅灰岩发育的层段),孔隙度为主要影响因素。同样,含水饱和度代表的含流体性质对弹性参数也会产生较大影响。

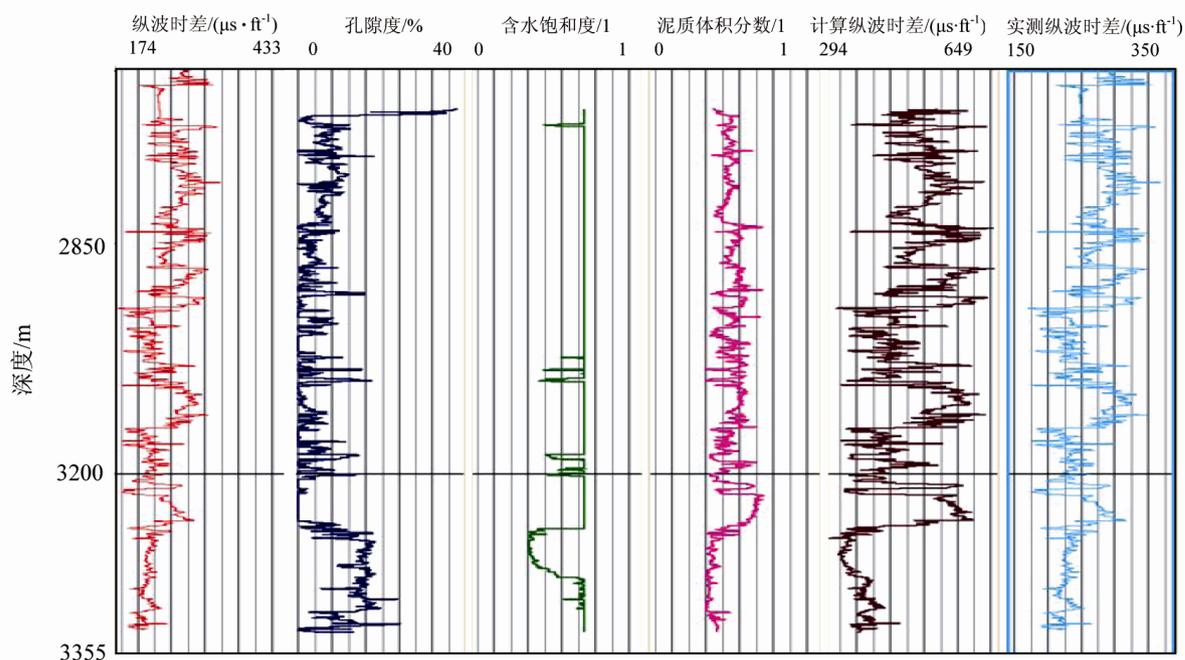


Figure 1. Well logs used in The S-wave calculation for Well P-019 of Block 18 in Ecuador

图 1. 厄瓜多尔 18 区块 P-019 井横波时差计算

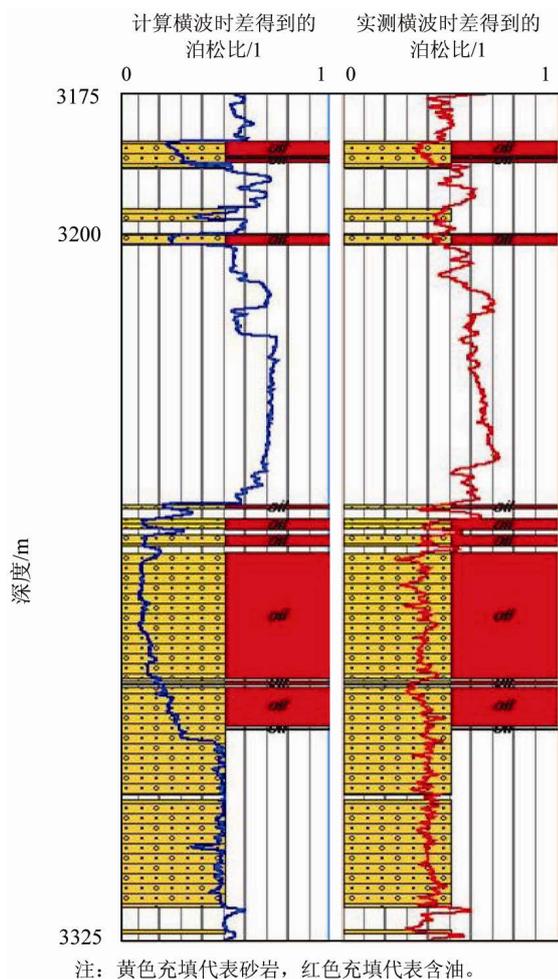
应用上述方法对研究区的 P-019 井进行了横波时差计算(图 1),可以看出,通过将纵波时差、孔隙度、含水饱和度、泥质含量和密度等常规测井资料综合运用,结合流体弹性参数构建的 Xu-White 模型,算出的横波时差与该井实测的横波时差趋势基本一致。

为验证该方法在全区的可操作性,将研究区内其他有实测横波时差曲线的井进行了横波时差计算,并将计算的横波时差与实测的横波时差曲线进行对比,结果表明,计算的横波时差曲线与实测的横波时差曲线形态非常相似,绝对值误差较小,能够能满足叠前弹性阻抗反演和地下流体预测的需求。

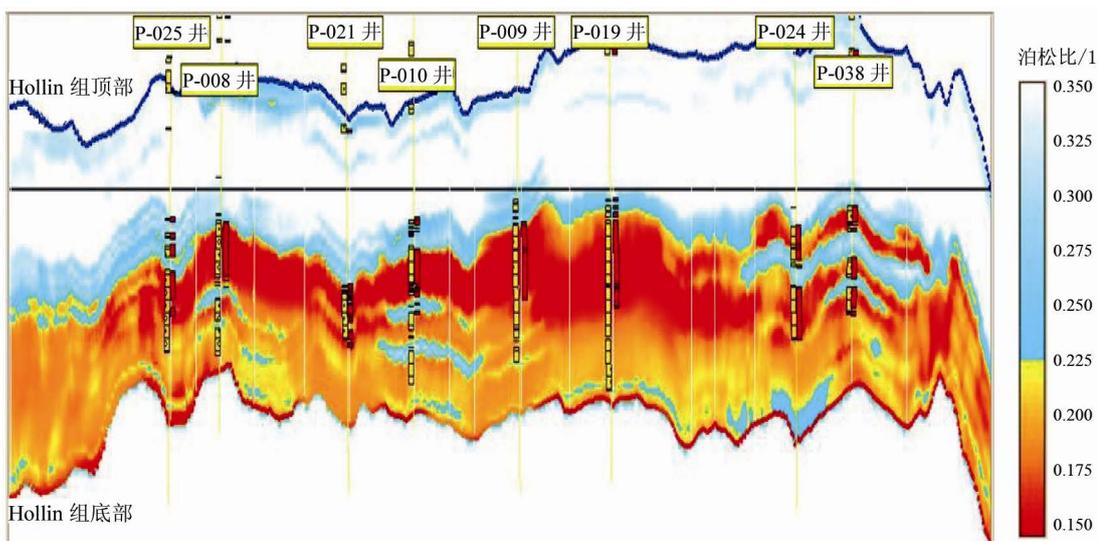
但是,部分井的个别位置出现了实测横波时差曲线与计算横波时差曲线偏幅值不同的情况。为了求证计算结果的可信性,根据岩石弹性力学理论,利用纵、横波测井资料求得连续的动态泊松比  $\nu$ ,  $\nu = [0.5 \times (\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 1] / [(\Delta t_s / \Delta t_p)^2 - 1]$  (其中,  $\nu$  是岩石的动态泊松比, 1;  $\Delta t_p$ 、 $\Delta t_s$  分别为地层的纵、横波时差,  $\mu\text{s}/\text{ft}$ )。通过对比计算横波与实测横波计算出的泊松比曲线(图 2)可以看出,在含油层段(3180~3185 m, 3192~3193.5 m, 3199.3~3201.7 m),使用计算的横波时差算出的泊松比曲线反映更明显(泊松比为 0.22~0.24),而实测横波时差算出的泊松比曲线对岩性和含油性的区分都不够明显(偏幅较小)。

通过叠前弹性参数反演,根据泊松比对储层流体变化较敏感的特点,进行泊松比叠前反演(图 3),结果表明,厄瓜多尔 18 区块含油地层的泊松比(0.09~0.24)与含水地层的泊松比(0.24~0.275)或干层区分明显,可用来反映储层中流体的变化情况; Hollin 组含油砂岩多分布在底部(泊松比小于 0.20),且较连续,厚度较大,而 Hollin 组顶部多为干砂层或泥岩,砂岩储层局部发育,且多为水层。通过规律总结,针对研究区地质情况建议并部署了 P-018 井,获得了高产工业油流。

结果表明,使用对岩性和流体更加敏感的横波曲线参与叠前弹性参数反演,可大幅提高油气预测的准确性。



**Figure 2.** The comparison of Posing ratio logs in Well P-019 of Block 18 in Ecuador  
**图 2.** 厄瓜多尔 18 区块 P-019 井泊松比曲线对比



**Figure 3.** The Posing ratio inversion section in Well P-019 of Block 18 in Ecuador  
**图 3.** 厄瓜多尔 18 区块过 P-019 井泊松比反演剖面

## 4. 结语

在 Kuster-Toksoz 方程和 Gassmann 方程基础上, 结合 Xu-White 模型建立的方法能够解决实际生产中横波速度测井资料缺乏的问题, 是计算横波速度的有效方法; 经与实测资料对比, 所得横波速度可信; 有利于对储层岩性、物性及流体的识别, 提高油气检测的可靠性。

## 基金项目

中国地质调查局项目(DD20160196)。

## 参考文献 (References)

- [1] Quakenbush, M., Shang, B. and Tuttle, C. (2006) Poisson Impedance. *The Leading Edge*, **25**, 128-138. <https://doi.org/10.1190/1.2172301>
- [2] 王金伟, 张尔华, 谢春临. 虚拟孔隙度优化 Xu-White 模型法预测横波速度[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 445-448.
- [3] 魏阳庆, 何坤萍, 姜钧. 全波列声波测井在地应力分析中的应用[J]. 断块油气田, 2000, 7(3): 33-35.
- [4] 李庆忠. 岩石的纵、横波速度规律[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(1): 1-12.
- [5] Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.I. (1985) Relationship between Compressional Wave and Shear Wave Velocities in Clastic Rocks. *Geophysics*, **50**, 571-581. <https://doi.org/10.1190/1.1441933>
- [6] Greenberg, M.L. and Castagna, J.P. (1992) Shear-Wave Velocity Estimation in Porous Rocks: Theoretical Formulation, Preliminary Verification and Application. *Geophysical Prospecting*, **40**, 195-209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00371.x>
- [7] 马中高, 解吉高. 岩石的纵、横波速度与密度的规律研究[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 905-910.
- [8] 孙玉凯, 郑雷清. 基于常规测井资料的横波时差估算方法及应用[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 521-522.
- [9] Levin, F.K. 张仪宁译. 由纵波和转换波资料估计横波速度[J]. 石油物探译丛, 1999(5): 47-49.
- [10] Knackstedt, M.A., Arns, C.H. and Pinczewski, W.V. (2005) Velocity-Porosity Relationship: Predictive Velocity Model for Cemented Sands Composed of Multiple Mineral Phases. *Geophysical Prospecting*, **53**, 349-372. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2005.00479.x>
- [11] Lee, M.W. (2006) A Simple Method of Predicting S-Wave Velocity. *Geophysics*, **71**, 161-164. <https://doi.org/10.1190/1.2357833>
- [12] Xu, S. and White, R.E. (1995) A New Velocity Model for Clay-Sand Mixtures. *Geophysical Prospecting*, **43**, 91-118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00126.x>
- [13] Xu, S. and White, R.E. (1996) A Physical Model for Shear-Wave Velocity Prediction. *Geophysical Prospecting*, **44**, 687-717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00170.x>
- [14] Keys, R.G. and Xu, S. (2002) An Approximation for the Xu-White Velocity Model. *Geophysics*, **67**, 1406-1414. <https://doi.org/10.1190/1.1512786>
- [15] 牟汉生, 姜在兴, 田继军, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地南部区块 Napo 组层序地层特征及成藏条件分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(5): 45-48.
- [16] 徐佑德, 柳忠泉, 许世红, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地 16 区块油气地质及勘探潜力[J]. 海洋石油, 2006, 26(3): 25-30.
- [17] White, H., Ju Skopec, R.A., Rodas, J.A., *et al.* (1995) Reservoir Characterization of the Hollin and Napo Formation, Western Oriente Basin in Ecuador. In: Tankard, A.J., Suárez, R.S. and Welsink, H.J., Eds., *Petroleum Basins of South America*, AAPG Memoir 62, Tulsa, 573-596.

[编辑] 龚丹

**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：[jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)