https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.417



## 基于统计学岩石物理模型的火山岩横波速度预测方法

乔汉青<sup>1,2</sup>,刘 财<sup>3</sup>,方 慧<sup>1,2</sup>,朱 威<sup>1,2\*</sup>

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心,河北廊坊 065000

3. 吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林长春130026

摘 要:火山岩储层因蕴藏地热、矿产、油气等资源,受到各国学者的广泛关注.横波速度是地震AVO分析、储层特征描述和流体识别的必要信息,因受限于采集技术和采集成本等因素,测井资料中常常缺失横波速度信息.基于统计学岩石物理反演方法和Xu-White岩石物理模型,提出了一种适用于火山岩储层的统计学岩石物理模型横波速度预测方法.该方法利用Xu-White模型中砂的纵、横波速度和粘土相关孔隙纵横比作为关键岩石物理参数对岩石速度的影响,根据统计学岩石物理反演方法,首先通过已知参考井常规测井资料和Xu-White模型构建关键岩石物理参数的先验分布,其次利用先验分布代替固定参数值初始化Xu-White模型建立统计学岩石物理模型,再次基于贝叶斯反演理论,匹配目标井位实际纵波速度与模拟纵波速度,计算目标井位关键岩石物理参数后验信息,最后利用统计学岩石物理模型和目标井关键岩石物理参数的后验分布反演出目标井的横波速度信息.将该方法应用于中国东部南堡凹陷5号构造实际测井数据,得到的横波速度预测结果优于常规方法,证明了该方法的有效性和准确性.研究将为火山岩储层的后续勘探开发提供更准确的横波速度资料.
 关键词:火山岩储层;横波速度预测;Xu-White模型;统计学岩石物理模型;贝叶斯反演;地球物理.
 中图分类号: P31

## S-Wave Velocity Prediction Method of Volcanic Rock Based on Statistical Rock-Physics Model

Qiao Hanqing<sup>1,2</sup>, Liu Cai<sup>3</sup>, Fang Hui<sup>1,2</sup>, Zhu Wei<sup>1,2\*</sup>

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China

2. Laboratory of Geophysical EM Probing Technologies, MLR, Langfang 065000, China

3. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

**Abstract:** Because of its geothermal, mineral, and oil and gas resources, volcanic rock reservoirs have piqued the interest of scholars from all over the world. Shear-wave velocity is crucial for seismic AVO analysis, reservoir characterization, and fluid identification. Shear wave velocity information is often missing in logging data due to limitations in acquisition technology and acquisition cost.Based on the statistical petrophysical inversion method and Xu-White model, this paper proposes a S-wave velocity prediction method of statistical rock-physics model suitable for volcanic reservoirs. This method uses the P-wave and S-wave velocity of sand and the aspect

作者简介:乔汉青(1990-),男,工程师,主要从事岩石物理、地震各向异性和地震正反演等方面的研究. ORCID:0000-0002-8719-0542. E-mail:qiaohanqing@mail.cgs.gov.cn

\* 通讯作者:朱威, ORCID:0000-0002-5566-8679. E-mail:cgszhuwei@mail.cgs.gov.cn

**引用格式:**乔汉青,刘财,方慧,朱威,2023.基于统计学岩石物理模型的火山岩横波速度预测方法.地球科学,48(8):2993-3006. **Citation:**Qiao Hanqing,Liu Cai,Fang Hui,Zhu Wei,2023.S-Wave Velocity Prediction Method of Volcanic Rock Based on Statistical Rock-Physics Model.*Earth Science*,48(8):2993-3006.

**基金项目:**中国地质调查项目(No. DD20221638);中国地质调查局基本科研项目(No. AS2022J04);中国地质调查局基本科研项目(No. AS2020J02);中国地质调查局基本科研项目(No. AS2020P01).

ratio of clay-related pores in the Xu-White model as the key petrophysical parameters affecting rock velocity. Firstly, according to the statistical rock physical inversion method, the prior distribution of key petrophysical parameters is constructed by the conventional logging data of reference wells and the Xu-White model. Secondly, the prior distribution is used to initialize the Xu-White model instead of the fixed parameter value to establish the statistical rock-physics model. Thirdly, based on the Bayesian inversion theory, the actual P-wave velocity and the simulated P-wave velocity of the target well are matched to calculate the posterior information of key petrophysical parameters of the target well. Finally, the S-wave velocity information of the target well. This method is applied to the actual logging data of No. 5 structure in Nanpu Sag, eastern China, and the S-wave velocity prediction results are better than those of the conventional method, which proves the effectiveness and accuracy of this method. This study will provide more accurate S-wave velocity for the subsequent exploration and development of volcanic reservoirs.

Key words: volcanic reservoir; S-wave velocity prediction; Xu-White model; statistical rock-physics model; bayesian inversion; geophysics.

## 0 引言

火山岩储层蕴藏多种资源,包括地下热能、矿产 资源、地下水和油气藏等.随着勘探开发程度不断深 入,火山岩储层作为一种特殊的油气藏类型备受关注. 自世界上第一个火山岩油气藏在美国加利福尼亚州 被发现以来,俄罗斯、古巴、阿根廷、日本等国先后发 现了高产的火山岩油气藏(Hunter and Davies,1979; Hawlander,1990;Zimmermann *et al.*,1992).20世纪70 年代起,在我国渤海湾盆地、新疆准噶尔盆地、内蒙二 连盆地、江汉盆地、苏北盆地、塔里木盆地和海拉尔盆 地等地相继发现了火山岩油气藏(张超等,2009;Xing *et al.*,2021;吴海波等,2022).随着火山岩油气藏的不 断发现,火山岩油气藏储层评价技术也进入了新发展 阶段,火山岩的岩性识别、储层描述和裂缝属性等成 为研究的核心内容.

横波速度在地震叠前反演和储层属性分析中 起关键作用,同时也是岩石物性反演、储层岩性和 裂缝流体识别的重要参数.然而,在实际生产中,受 井位条件、测井技术和采集成本的限制,测井资料 中横波速度信息往往较为匮乏,因此火山岩横波速 度预测便成为亟需解决的重要问题.为解决此问 题,许多学者利用常规测井资料和相关理论方法预 测横波速度,主要分为经验公式法、岩石物理模型 法和机器学习智能预测法.基于经验公式的方法是 在横波速度和测井数据之间建立了简单且直接的 关系. Castagna et al.(1985)提出了"泥岩线"公式, 给出纵、横波速度之间的经验关系. Han et al. (1986)考虑孔隙度和粘土含量对速度的影响,给出 了不同压力下纵、横波速度之间的线性回归方程. Greenberg et al.(1992)提出了多种矿物组分的水饱 和的纵、横波速度经验公式. Yan et al. (2002)考虑 孔隙纵横比对速度的影响,改进了 Han et al.(1986) 的经验公式.利用经验公式法预测横波速度,是依 据实际横波速度和其他测井数据建立的拟合关系, 未考虑岩石的物理机理,依赖样本数据的质量,预 测结果准确性不足.基于机器学习和人工神经网络 的智能预测方法(Rajabi et al.,2010;王晓光,2013; Zhang et al.,2020)是根据大量目标参数的真实数 据(如V<sub>s</sub>),通过预测机训练得到横波速度与其它测 井数据的强非线性关系,再根据此关系预测横波速 度.该方法同样未考虑岩石的物理机理,因此缺乏 训练数据范围之外的外推,对样本数据的数量和质 量要求较高,且预测过程复杂、计算效率不高.

岩石物理模型描述了微观结构对岩石整体属 性的影响,将岩石的微观特征(如孔隙度、孔隙结 构)与宏观特征(如弹性模量、速度)联系起来,因此 基于岩石物理模型的横波速度预测方法成为了现 行的主流方法.Berryman(1980)提出了等效介质自 相容近似模型(SCA),假设岩石是由不同孔隙纵横 比的椭球体组成的. Xu and White(1995,1996)考虑 储层岩石的孔隙几何形态,提出了泥质砂岩储层的 等效介质模型. Keys and Xu(2002)引入干岩石模量 的近似方程对 Xu-White 模型进行了改进. Ruiz and Dvorkin (2010) 提出了基于微分等效介质模型 (DEM),采用固定的孔隙纵横比进行横波速度预 测. 白俊雨等(2012)采用可变的孔隙纵横比改进了 Xu-White模型.张冰等(2018)建立了适用于各向异 性页岩储层参数反演的统计岩石模型,为横波速度 预测提供了参考. Sohail and Hawkes(2020)评估了 用于横波速度预测的经验模型和岩石物理模型,并 认为修正后的 Xu-White 模型是当前可用方法的最 佳选择.

目前,针对砂岩、碳酸盐岩储层的岩石物理横

波速度预测方法较为成熟,而针对火山岩储层的岩 石物理模型相关研究较少.火山岩的岩性复杂,一 般将其分为火山熔岩和火山碎屑岩两大类(王德滋 和周新民,1982;赵鹏飞等,2021).火山岩储层具有 复杂的矿物组分和多样的孔隙结构等特征(Pan et al., 2008: 张丽华, 2009: 张丽华等, 2020). Pan et al. (2008)基于分类方案,提出了一种 QAPM 火山岩岩 石物理模型,模型中将Q(石英)、A(碱性长石)、P (斜长石)、M(镁铁质)作为主要矿物类型并加入了 孔隙,但未考虑凝灰质的影响. Zhao et al. (2009)基 于等效介质自相容近似模型(SCA),将酸性火山岩 视为基质矿物,中基性火山岩视为充填矿物,建立 了二元岩石物理模型,模型中未考虑火山岩多种矿 物和孔隙结构的特征. Xu et al. (2020)结合 Xu-White模型与微分等效介质模型(DEM)提出了各向 同性岩石物理模型并添加了多种矿物和孔隙,模型 中未考虑孔隙结构的影响.在火山岩岩石物理模型 构建及横波速度预测研究中,如何兼顾多种矿物组 分和复杂孔隙结构对岩石性质的影响,以及横波预 测中需要较多测井数据和岩心数据的问题研究 较少.

针对上述方法存在的不足,结合已有的研究成 果和火山岩储层的特点,以中国东部渤海湾盆地南 堡 5 号构造的典型火山熔岩区油气藏为例,本文提 出了一种基于统计学岩石物理模型的火山岩横波 速度预测方法.该方法以Xu-White模型为基础,分 析了模型中影响岩石速度的关键岩石物理参数,根 据统计学岩石物理反演方法,利用参考井位常规测 井资料等先验信息形成关键岩石物理参数的先验 分布,以先验分布代替固定参数初始化Xu-White模 型构建统计学岩石物理模型,在贝叶斯反演框架 下,以目标井位实际纵波速度为约束条件,利用模 拟退火粒子群算法(刘财等,2017;乔汉青,2017), 得到目标井位关键岩石物理参数的后验分布及最 优参数,最后利用统计学岩石物理模型和目标井位 岩石物理参数反演出目标井位的横波速度信息.该 方法考虑了火山岩储层多矿物组分和复杂孔隙结 构的特征,同时解决了目标井位测井资料不足、矿 物组分信息缺失条件下的横波速度预测,通过对实 际火山岩常规测井资料进行测试,验证该方法的有 效性和准确性.

## 1 常规火山岩横波速度预测方法

#### 1.1 基于 Han 经验公式的火山岩横波速度预测

利用经验公式法来预测横波速度的基础是由 实际数据建立起的岩石不同属性之间的联系.这类 方法直接建立了目标参数和测井曲线之间的关系, 计算简单且普遍应用于实际横波速度预测问题.

Han et al.(1986)通过测量不同压力下的岩样 并考虑孔隙度和粘土含量的影响,给出了纵、横波 速度之间的线性回归方程.可利用火山岩常规测井 资料和Han公式直接预测横波速度,公式如下:

 $V_{\rm p} = 5.59 - 6.93\phi - 2.18C, \tag{1}$ 

$$V_{\rm s} = 3.52 - 4.91\phi - 1.89C, \tag{2}$$

其中: $V_{p}$ 为纵波速度(km/s); $V_{s}$ 为横波速度(km/s); $\phi$ 为孔隙度;C为粘土含量.

#### 1.2 基于 Xu-White 模型的火山岩横波速度预测

由于火山岩成岩机制的特殊性,孔隙类型复杂 多样,其中凝灰质矿物和粘土相似,考虑到凝灰质 矿物所占比例较大,在构建火山岩岩石物理模型时 不能忽略.相比于包裹体理论,Xu-White模型忽略 了矿物颗粒的细节,更注重孔隙的性质,故此使用 Xu-White模型构建火山岩岩石物理模型来预测横 波速度.

Xu and White(1995,1996)考虑孔隙度、基质性质、流体和孔隙纵横比等因素,结合Gassmann流体替换方程、K-T方程和微分等效介质理论(DEM)提出了Xu-White模型.模型的基质由砂和粘土组成,孔隙可分为具有较大孔隙纵横比的砂相关孔隙和具有较小孔隙纵横比的粘土相关孔隙.公式表达如下:

$$\phi = \phi_{\rm s} + \phi_{\rm c}, \tag{3}$$

$$\phi_s = f_s \frac{\phi}{1 - \phi},\tag{4}$$

$$\phi_{c} = f_{c} \frac{\phi}{1 - \phi},\tag{5}$$

$$K_{\rm d} - K_{\rm 0} = \frac{1}{3} (K_{\rm 1} - K_{\rm 0}) \frac{3K_{\rm d} + 4\mu_{\rm 0}}{3K_{\rm 0} + 4\mu_{\rm 0}} \sum_{l=s,c} \phi_{\rm 1} T_{iijj}(\alpha_{\rm 1}), (6)$$

$$\mu_{d} - \mu_{0} = \frac{\left(\mu_{1} - \mu_{0}\right)}{5} \frac{6\mu_{d}\left(K_{0} + 2\mu_{0}\right) + \mu_{0}\left(9K_{0} + 8\mu_{0}\right)}{5\mu_{0}\left(3K_{0} + 4\mu_{0}\right)} \sum_{l=s,c} \phi_{1}F(\alpha_{1}), \qquad (7)$$

$$F(\alpha) = T_{ijij}(\alpha) - \frac{T_{iijj}(\alpha)}{3}, \qquad (8)$$

其中: $\phi, \phi_s, \phi_c$ 分别为总孔隙度、砂相关孔隙度、粘土 相关孔隙度; $f_s \approx f_c$ 为砂的体积分数和粘土的体积 分数,且 $f_s + f_c = 1 - \phi$ ; $K_d, K_0, K_1$ 分别为岩石骨 架、岩石矿物基质、孔隙流体的体积模量(GPa); $\mu_d$ 、  $\mu_0, \mu_1$ 分别为岩石骨架、岩石矿物基质、孔隙流体的 剪切模量(GPa),对于干岩石来说, $K_1 \approx \mu_1$ 为零,  $F(\alpha), T_{iiii}(\alpha), T_{iiii}(\alpha)$ 为关于孔隙纵横比 $\alpha$ 的函数.

为了避免DEM 微分计算中迭代运算计算量过 大的问题, Keys and Xu(2002)对 Xu-White 模型进 行改进,利用求解一阶线性常微分方程组确定岩石 骨架弹性模量,泥质砂岩干岩石骨架的弹性模量表 达式如下:

$$K_{\rm d} = K_0 (1 - \phi)^{\rho}, \qquad (9)$$

$$\mu_{\rm d} = \mu_0 (1 - \phi)^q, \tag{10}$$

式中:*p*和*q*为几何因子,其关系式如下:

$$p = \frac{1}{3} \sum_{l=s,c} f_l T_{iij}(\alpha_l), \qquad (11)$$

$$q = \frac{1}{5} \sum_{l=s,c} f_l F(\alpha_l), \qquad (12)$$

其中:fi为相关矿物组分的体积分数.

Berryman(1980)提出了N相混合物自相容近 似模型(SCA)来估计多相介质的等效弹性模量,同 时给出了计算p和q所需的标量.

$$T_{iijj}(\alpha_l) = \frac{3F_1}{F_2},\tag{13}$$

$$F(\alpha_{l}) = \frac{2}{F_{3}} + \frac{1}{F_{4}} + \frac{F_{4}F_{5} + F_{6}F_{7} - F_{8}F_{9}}{F_{2}F_{4}}, \quad (14)$$

其中:

$$F_{1} = 1 + A \left[ \frac{3}{2} (f+\theta) - R(\frac{3}{2}f+\frac{5}{2}\theta-\frac{4}{3}) \right], (15)$$

$$F_{2} = 1 + A \left[ 1 + \frac{3}{2} (f+\theta) - R \left( \frac{3}{2}f+\frac{5}{2}\theta \right) \right] + B(3-4R) + \frac{A}{2} (A+3B)(3-4R) \left[ f + \theta - R \left( f - \theta + 2\theta^{2} \right) \right], (16)$$

$$F_{3} = 1 + A \left[ 1 - \left( f + \frac{3}{2} \theta \right) - R \left( f + \theta \right) \right], \quad (17)$$

$$F_4 = 1 + \frac{A}{4} \Big[ f + 3\theta - R \big( f - \theta \big) \Big], \tag{18}$$

$$F_{5} = A\left[-f + R\left(f + \theta - \frac{4}{3}\right)\right] + B\theta(3 - 4R), (19)$$

$$F_{5} = 1 + A\left[1 + f - R\left(f + \theta\right)\right] + B(1 - \theta)$$

$$\theta)(3-4R), \qquad (20)$$

$$F_{7} = 2 + \frac{A}{4} \Big[ 3f + 9\theta - R \Big( 3f + 5\theta \Big) \Big] + B\theta \Big( 3 - 4R \Big), (21)$$

$$F_{8} = A \Big[ 1 - 2R + \frac{f}{2} (R - 1) + \frac{\theta}{2} (5R - 3) \Big] + \frac{\theta}{2} (1 - \theta) \Big( 3 - 4R \Big). (22)$$

 $F_{9} = A [(R-1)f - R\theta] + B\theta(3-4R). (23)$ 上式中部分参数由下式求出:

$$A = \frac{\mu_{\rm j}}{\mu_{\rm m}} - 1, B = \frac{1}{3} \left( \frac{K_{\rm j}}{K_{\rm m}} - \frac{\mu_{\rm j}}{\mu_{\rm m}} \right),$$

$$R = \frac{3\mu_{\rm m}}{3K_{\rm m} + 4\mu_{\rm m}},$$

$$\theta = \frac{\alpha}{\left(1 - \alpha^2\right)^{\frac{3}{2}}} \left[ \arccos \alpha - \alpha \left(1 - \alpha^2\right)^{\frac{1}{2}} \right], f = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3\theta - 2),$$

其中: $K_i$ 和 $\mu_j$ 分别为各矿物组分的体积模量(GPa) 和剪切模量(GPa), $K_m$ 和 $\mu_m$ 分别为矿物基质的体积 模量(GPa)和剪切模量(GPa).

岩石物理模型将岩石的微观结构和成分与整体属性联系在一起,描述了岩石内部属性对外在弹性属性的影响.地震波在均匀、各向同性弹性介质中,波速可以用岩石体积模量、剪切模量和密度来表示:

$$V_{\rho} = \sqrt{\frac{\left(K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\,\mu_{\text{sat}}\right)}{\rho_{\text{sat}}}},\qquad(24)$$

$$V_{s} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{sat}}}{\rho_{\text{sat}}}},$$
(25)

其中: $K_{sat}$ 和 $\mu_{sat}$ 为流体饱和岩石体积模量(GPa)和 剪切模量(GPa), $\rho_{sat}$ 为流体饱和岩石密度(g/cm<sup>3</sup>),  $V_{\rho}$ 、 $V_{s}$ 为流体饱和岩石的纵、横波速度(km/s).

Gassmann流体替换方程(Gassmann,1951)可 以通过一种流体饱和岩石速度预测另外一种流体 饱和岩石速度,同样也可以用岩石骨架速度预测流 体饱和岩石速度,其关系式如下:

$$\frac{K_{\text{sat}}}{K_0 - K_{\text{sat}}} = \frac{K_{\text{d}}}{K_0 - K_{\text{d}}} + \frac{K_1}{\phi(K_0 - K_1)}, \quad (26)$$
  
$$\mu_{\text{sat}} = \mu_{\text{d}}, \quad (27)$$

其中: $K_{\text{sat}}$ 和 $\mu_{\text{sat}}$ 为流体饱和岩石体积模量(GPa)和 剪切模量(GPa).

Xu-White模型中流体饱和岩石的密度由以下 公式给出:

$$\rho_{\rm sat} = (1 - \phi) \rho_0 + \phi \rho_{\rm f}, \qquad (28)$$

$$\rho_0 = f_{\rm s} \rho_{\rm s} + f_{\rm c} \rho_{\rm c}, \qquad (29)$$

$$\rho_{\rm f} = (1 - S_{\rm w}) \rho_{\rm gas} + S_{\rm w} \rho_{\rm water}, \qquad (30)$$

其中: $\rho_0$ 和 $\rho_f$ 分别为矿物基质的密度和饱和流体的 密度(g/cm<sup>3</sup>); $S_w$ 为含水饱和度; $\rho_s$ 、 $\rho_c$ 、 $\rho_{gas}$ 和 $\rho_{water}$ 分 别为砂、粘土、气和水的密度(g/cm<sup>3</sup>).

Hill平均(Hill,1952)可以在不考虑矿物几何形状的条件下计算基质矿物的模量:

1

$$M_{\rm H} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^{N} f_i M_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{f_i}{M_i}} \right], \qquad (31)$$

其中:i为基质中某一矿物; $M_i$ 为矿物所对应的模量 (GPa); $f_i$ 为矿物所对应的体积分数, $M_{\rm H}$ 为Hill有效 模量(GPa).

Wood公式(Wood,1956)可以计算孔隙流体混 合物的等效模量,如下:

$$\frac{1}{K_f} = \sum_{i=1}^{N} \frac{f_i}{K_i},$$
(32)

其中: *f*<sub>i</sub>, *K*<sub>i</sub>分别为流体组分的体积分数和体积模量(GPa).

当给定火山岩中砂、粘土和孔隙的体积分数、 密度和固有模量,砂相关孔隙纵横比,先利用Hill平 均计算矿物基质模量,通过Xu-White模型计算出岩 石的骨架模量,再利用Wood公式计算孔隙流体模 量,通过Gassmann流体替换方程计算出流体饱和 岩石的弹性模量,最后利用速度方程计算出饱和岩 石的横、纵波速度.

# 2 Xu-White模型中影响岩石速度性质的关键岩石物理参数

常规测井资料中仅有部分测井曲线,如密度、 速度、孔隙度、粘土含量和含水饱和度等,矿物组分 信息往往缺失.基于经验公式法预测横波速度是直 接建立测井曲线与纵、横波速度间的关系进行求 取,而基于岩石物理模型预测横波速度时需要更多的细节.利用Xu-White模型预测横波速度时通常进行简化,假定了模型中砂、粘土的性质不随深度变化,其物性参数是通过实验或经验得出的常数,这使得在缺失矿物组分信息的条件下预测岩石速度成为可能.但实际岩石中矿物基质的性质、孔隙度和孔隙纵横比等随深度的变化而改变,视为常数对横波速度预测的准确性造成很大影响.

Xu-White模型中砂的纵、横波速度可以通过时 间平均公式来求取(Xu and White, 1995, 1996),公 式如下:

$$K_{0} = \rho_{0} \left[ \frac{1}{\left(T_{0}^{P}\right)^{2}} + \frac{4}{3\left(T_{0}^{S}\right)^{2}} \right], \qquad (33)$$

$$\boldsymbol{\mu}_{0} = \boldsymbol{\rho}_{0} \left[ \frac{1}{\left(T_{0}^{s}\right)^{2}} \right], \tag{34}$$

$$T_{0}^{P} = \left(1 - f_{c}'\right)T_{s}^{P} + f_{c}'T_{c}^{P}, \qquad (35)$$

$$T_{0}^{s} = (1 - f_{c}')T_{s}^{s} + f_{c}'T_{c}^{s}, \qquad (36)$$

$$f_{\rm c}' = \frac{f_{\rm c}}{1-\phi},\tag{37}$$

$$o_{0} = (1 - f_{c}') \rho_{s} + f_{c}' \rho_{c}, \qquad (38)$$

其中: $T_0^{\text{P}}$ 、 $T_s^{\text{P}}$ 和 $T_c^{\text{P}}$ 分别为基质、砂和粘土的纵波传播时间(s); $T_0^{\text{s}}$ 、 $T_s^{\text{s}}$ 和 $T_c^{\text{s}}$ 分别为基质、砂和粘土的横波传播时间(s),传播时间是速度的倒数; $f_c$ 为归一化的粘土体积分数.

如图1所示,给出了Xu-White模型中不同砂的 速度下岩石的纵、横波速度.结果表明,岩石速度受 基质中砂的速度影响较大,常规Xu-White模型中简 化砂的速度性质会导致横波速度预测的误差.

在Xu-White模型中,孔隙度和孔隙纵横比被认 为是影响岩石性质的主要因素.砂相关孔隙和粘土 相关孔隙的性质不同,在常规Xu-White模型中采用 固定的孔隙纵横比,砂相关孔隙纵横比(α<sub>s</sub>)为 0.10~0.12,粘土相关孔隙纵横比(α<sub>c</sub>)为0.03~0.04, 其中粘土颗粒倾向于形成较小纵横比的孔隙(Xu and White,1995,1996).如图2,3所示,给出了Xu-White模型在不同性质孔隙、不同孔隙纵横比下模 拟的岩石纵、横波速度.结果表明,两种性质的孔隙 结构对岩石速度均有影响,岩石速度随孔隙度的增 加而减小,随孔隙纵横比的增加而增大,但砂相关 孔隙纵横比对岩石速度不敏感,反观粘土相关孔隙 纵横比对其影响较大.因此,在求取砂相关孔隙纵 横比时,可采用 Pillar *et al.*(2007)给出的砂相关孔



Fig. 1 The simulated P-wave and S-wave velocities of rock with different velocities of sand in Xu-White model



Fig. 2 The simulated P-wave and S-wave velocities with different aspect ratios of sand-related pores in Xu-White model



图 3 Xu-White 模型中不同粘土相关孔隙纵横比下模拟出的岩石纵、横波速度 Fig. 3 The simulated P-wave and S-wave velocities with different aspect ratios of clay-related pores in Xu-White model

隙纵横比(α<sub>s</sub>)的计算公式:

 $\alpha_s = 0.17114 - 0.24477\phi + 0.004314f_c$ , (39) 其中: $\alpha_s$ 为砂相关孔隙纵横比; $\phi$ 为总孔隙度; $f_c$ 为粘 土的体积分数.

结合前人的研究成果(Ruiz and Dvorkin, 2010; 白俊雨等, 2012; Zhang et al., 2020)和文中对模型参数的分析,发现基质中砂的速度、孔隙度和粘土相关孔隙的纵横比对岩石速度影响最大,可以作为Xu-White模型中影响岩石速度性质的关键岩石物理参数.

3 基于统计学岩石物理模型的火山 岩横波速度预测方法

#### 3.1 统计学岩石物理模型的先验信息

先验信息指研究区域的实际数据、经验信息和 试验结果等.常规的横波速度预测方法,使用的某 些物性参数是由先验信息转化得到的常数,但大量 的先验信息经统计后会表现出特定的统计学特征. 统计学岩石物理方法(Bachrach, 2006; Grana and Della Rossa, 2010; Yuan *et al.*, 2016; 张冰等, 2018) 的提出解决了上述先验信息的利用问题,该方法已 被应用于储层特征描述等研究,不仅可以得到了较好的反演结果,而且提供了一些统计学信息.在横波速度预测过程中可将先验信息的统计学特征融入岩石物理模型,利用先验信息建立关键物性参数分布,并将其应用于目标参数反演过程.

因实际测井资料受井位条件、采集技术和成本 等条件限制,目标区内往往仅有少数井位或部分井 段具有准确且完整的测井资料和矿物组分信息.先 验信息是建立关键岩石物理参数分布的必要信息, 因此这些高质量井位或井段资料可作为先验信息, 称为参考井.参考井信息内容丰富,包括纵、横波速 度、矿物信息、密度和孔隙度等.

#### 3.2 横波速度预测流程

本文提出了一种基于统计学岩石物理模型的 横波速度预测方法.该方法以Xu-White模型为基 础,以严重影响岩石速度且无法从常规测井资料中 获取的参数作为关键岩石物理参数,结合先验信息 形成关键岩石物理参数的先验分布,根据文中上述 分析结果,明确了砂的纵波速度、砂的横波速度和 粘土相关孔隙纵横比是Xu-White模型中影响岩石 速度的关键岩石物理参数.其中,砂相关孔隙纵横 比和砂的速度可由上述公式(33~39)求取,粘土相 关孔隙纵横比(α。)利用如下公式计算:

$$\alpha_{\rm c} = \arg\min\left(\left|\frac{\tilde{V}_{\rm p} - V_{\rm p}}{V_{\rm p}}\right| + \left|\frac{\tilde{V}_{\rm s} - V_{\rm s}}{V_{\rm s}}\right|\right), \quad (40)$$

其中: $\tilde{V}_{p}$ 和 $\tilde{V}_{s}$ 是利用Xu-White模型模拟的纵波速度(km/s)和横波速度(km/s).

由此,该方法利用参考井的先验信息得到关键 岩石物理参数的先验分布,并用其代替常数初始化 Xu-White模型进而构建统计学岩石物理模型.贝叶 斯反演框架可以在反演过程中将先验分布和统计 模型结合,并已应用于地球物理反演问题(Mollajan *et al.*,2019).因此,在贝叶斯反演框架下,将关键岩 石物理参数的先验分布融入到反演过程中,结合统 计学模型,以目标井的纵横波速度为约束,反演出 目标井的关键岩石物理参数的后验分布,其目标函 数如下:

$$m = \arg \max \left[ P(m|V_{p}) \right], \tag{41}$$

$$P(m|V_{p}) \propto P(V_{p}|m)P(m) =$$

$$N(V_{p}; \widetilde{V_{p}}, V_{1})N(m; E, V_{2}), \qquad (42)$$

其中: $m 为 V_{p,sand}$ 、 $V_{s,sand}$ 和 $\alpha_c$ 三参数组成的向量; $P(\bullet)$ )为概率函数; $N(\bullet)$ 为正态分布的概率; $V_1$ 为 $V_p$ 中噪声的方差; $V_2$ 为协方差矩阵;E为三参数期望值组成的向量.

为了解决反演问题中的非线性目标函数,可以 采用全局优化算法进行求解.模拟退火粒子群算法 (SA-PSO)是一种基于模拟退火思想的全局优化算 法,可有效改善传统粒子群算法中局部寻优能力, 能解决反演中非线性目标函数求解问题,已被应用 于储层描述的非线性反演问题(刘财等,2017;乔汉 青,2017).因此,将其应用于求解目标函数,通过搜 索参数m的最优解,使后验分布P(m|V<sub>p</sub>)最大.最 后,利用目标井关键岩石物理参数的后验分布和统 计学岩石物理模型预测目标井的横波速度信息.

图4为基于统计学岩石物理模型的横波速度预测工作流程,首先通过参考井的先验信息计算出Xu-White模型下关键岩石物理参数的先验分布;然后利用先验分布初始化Xu-White模型构建统计学岩石物理模型;再次在贝叶斯反演框架下,反演出目标井在模型下关键岩石物理参数的后验分布;最后利用后验分布和统计学岩石物理模型预测目标井的横波速度信息.



图4 基于统计学岩石物理模型的横波速度预测工作流程

Fig. 4 Workflow of S-wave velocity prediction based on statistical rock-physics model

## 4 实例分析

#### 4.1 实际井位资料

本文选取中国东部南堡凹陷5号构造实际井位 测井资料进行研究.研究区域位于渤海湾盆地黄骅 坳陷北部南堡凹陷西南庄断层下降盘,主要储层为 下第三系沙河街组的火山熔岩,中间夹不等厚火山 碎屑岩,其分布范围广、厚度大(张丽华,2009;张丽 华等,2010;朱学娟,2011).

图 5 给出了参考井的测井曲线和矿物组分信息, 测井曲线包括伽马射线(GR)、纵波速度(V<sub>p</sub>)、横波速 度(V<sub>s</sub>)、密度(ρ)、孔隙度(φ)和含水饱和度(S<sub>w</sub>).其中, 纵、横波速度呈正相关与伽马射线值呈负相关,孔隙 度较低符合火山熔岩岩石物理特征.参考井的矿物组 分信息中岩浆包裹体(SMI)组成成分对岩石物性影响 很大,经文献调研(王建伟等,2019),该井位中的岩浆 包裹体(SMI)主要成分是长石,故模型采用长石的物 性参数(模量、密度)替换岩浆包裹体(SMI)进行等效 计算,组分信息均通过测井资料和岩心数据得出,矿 物和孔隙流体的模量和密度见表1,图6给出了目标井 的测井曲线,两口井的井深相似、距离较近,但目标井 缺失矿物组分信息.



Fig. 6 Logging curves of target well

#### 4.2 不同方法预测结果与讨论

为了验证本文方法的可行性和准确性,文中将

利用基于 Han 经验公式法(Han, 1986)、基于常规 Xu-White 模型方法(白俊雨等, 2012)和基于统计学 物和了船运体的措导和家庭

农I 9初相扎你加件的侯里相省反						
Table 1Modulus and density of minerals and fluids						
	体积模量(Bulk modulus) (GPa)	剪切模量(Shear modulus)(GPa)	密度(Density)(g/cm <sup>3</sup> )			
石英(Quartz)	37.9	44.3	2.65			
岩浆包裹体(SMI)	37.5	15	2.62			
粘土(Clay)	25	9	2.55			
气体(Gas)	0.336	-	0.34			
水(Water)	2.2	-	1.40			



Fig. 7 Statistical prior information of key petrophysical parameters of reference wells

岩石物理模型方法对目标井进行横波速度预测,采 用均方差(MSE)和相关系数(r)进行定量评价,评 价公式如下:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left( \tilde{V}_i - V_i \right)^2, \qquad (43)$$

$$r = \frac{\operatorname{cov}\left(V, V\right)}{\sigma \tilde{V} \sigma V},\tag{44}$$

其中:i为深度点位; $\tilde{V}_i$ 和 $V_i$ 为预测速度(km/s)和 实际速度(km/s);N为深度点位总数;cov(•)为协方 差; $\sigma$ 为速度的标准偏差.

在利用基于统计学岩石物理模型预测目标井 横波速度时,首先在Xu-White模型下,利用参考井 的测井信息,反演出参考井中砂的纵波速度 (V<sub>P,sand</sub>)、砂的横波速度(V<sub>s,sand</sub>)和粘土相关孔隙纵 横比(α<sub>c</sub>)并形成3个关键岩石物理参数的统计学先 验信息,如图7所示,并以此建立用于后续过程的先 验分布;其次,利用关键岩石物理参数的先验分布 初始化Xu-White模型构建统计学岩石物理模型;再 次,利用目标井的已知测井信息,通过公式(28~30, 39)分别计算出目标井中砂的密度和砂相关孔隙纵 横比(α,);然后,利用贝叶斯反演框架,在统计学岩 石物理模型下,结合参考井的先验分布和目标井的 已知信息,求解目标函数(公式41~42),反演出目 标井的关键岩石物理参数的后验信息,如果8所示; 最后,利用目标井的岩石物理参数的后验分布和统 计学岩石物理模型计算出目标井的横波速度.3种 方法的横波速度预测结果如图9所示,其定量评价 结果如表2所示.







Fig.9 Prediction results of P-wave and S-wave velocities based on three methods

其中,基于Han经验公式的预测结果如图9绿

色实线所示,该方法是由大量实际数据拟合构建的

#### 表2 不同方法预测的 $V_{p}$ 和 $V_{s}$ 的均方误差(MSE)和相关系数(r)

Table 2 Mean square error (MSE) and correlation coefficient (r) of P-save and S-wave velocity predicted by different methods

	MSE of	MSE of	$r  {\rm of}  V_{\rm p}$	n of V
刀伝	$V_{ m p}$	$V_{\rm s}$		r of V <sub>s</sub>
Han经验公式	0.112 94	0.143 14	0.801 31	0.753 2
常规Xu-White模型	0.054 99	0.070 57	0.858 21	0.824 7
统计学岩石物理模型	0.022 41	0.030 12	0.967 13	0.956 9

方程,因此预测结果表现出全局误差较小并具有较 好的相关性,但在地层变化的特殊井段会存在局部 误差较大的情况,如图中4950~4965m.基于常规 Xu-White模型预测结果如图9蓝色实线所示,该方 法比基于Han经验公式的预测结果具有更好的相 关性,全局误差得到有效改善,横波速度预测结果 大幅提升,因为目标井的粘土相关孔隙纵横比(α<sub>c</sub>) 是在实际纵波速度约束下反演得到的,砂相关孔隙 纵横比(α,)由孔隙度和砂的体积分数计算得出,但 岩浆包裹体(SMI)中矿物组分无法准确给出,使得 参考井提供砂的先验信息存在偏差,导致结果与实 际数据仍有较大误差,如图中4946~4960m、4 985~4 990 m. 基于统计学岩石物理模型的预测结 果为最佳,如图9红色实线所示,该方法考虑了岩石 性质随井位深度变化造成的影响,以参考井的先验 分布利用贝叶斯理论对3个关键岩石物理参数进行 反演,过程中未使用过多计算所需的经验公式,在 缺失矿物组分信息的条件下,得出了目标井横波速 度预测所需的参数,有效减小了人为误差,其预测 结果与实际数据拟合程度高,全局误差和局部误差 均得到有效降低,相关性进一步提升,较上述两种 方法预测结果的准确性大幅提高,验证了本文方法 应用于火山岩储层测井区域横波速度预测的可行 性和准确性.

#### 5 结论

本文提出了一种基于统计学岩石物理模型的 火山岩储层横波速度预测方法.文中给出了统计学 岩石物理模型的构建细节,同时总结了统计学岩石 物理模型横波速度预测的工作流程,该方法适用于 测井信息丰富的少数井,也适用于仅有常规测井信 息的井位.本文方法利用关键岩石物理参数的先验 分布初始化Xu-White模型构建统计岩石物理模型, 模型更适用于火山熔岩区的井位,在贝叶斯反演框架下,结合目标井关键岩石物理参数的后验分布和统计岩石物理模型预测出火山岩储层的横波速度信息,通过与常规预测方法的预测结果相对比,验证了本文方法能有效提升预测结果精度,同时解决常规方法所需过多测井信息的问题.

#### References

- Bachrach, R., 2006. Joint Estimation of Porosity and Saturation Using Stochastic Rock-Physics Modeling. *Geophysics*, 71 (5):O53-O63.https://doi.org/10.1190/1.2235991
- Bai, J. Y., Song, Z. X., Su, L., et al., 2012. Error Analysis of Shear-Velocity Prediction by the Xu-White Model. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 589-595(in Chinese with English abstract).
- Berryman, J. G., 1980. Long Wavelength Propagation in Composite Elastic Media II. Ellipsoidal Inclusions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(6): 1820– 1831. https://doi.org/10.1121/1.385172
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., Eastwood, R. L., 1985. Relationships between Compressional-Wave and Shear-Wave Velocities in Clastic Silicate Rocks. *GEOPHYSICS*, 50 (4): 571-581. https://doi.org/10.1190/1.1441933
- Gassmann, F., 1951. Elastic Waves through a Packing of Spheres. *Geophysics*, 16(4): 673-685. https://doi.org/ 10.1190/1.1437718
- Grana, D., Della Rossa, E., 2010. Probabilistic Petrophysical -Properties Estimation Integrating Statistical Rock Physics with Seismic Inversion. *GEOPHYSICS*, 75(3): O21– O37. https://doi.org/10.1190/1.3386676
- Greenberg, M. L., Castagna, J. P., 1992. Shear-Wave Velocity Estimation in Porous Rocks: Theoretical Formulation, Preliminary Verification and Applications. *Geophysical Prospecting*, 40(2): 195-209. https://doi.org/10.1111/ j.1365-2478.1992.tb00371.x
- Han, D. H., Nur, A., Morgan, D., 1986. Effects of Porosity and Clay Content on Wave Velocities in Sandstones. *Geophysics*, 51(11): 2093-2107. https://doi.org/10.1190/ 1.1442062
- Hawlander, H. M., 1990. Diagenesis and Reservoir Potential of Volcanogenic Sandstones-Cretaceous of the Surat Basin, Australia. Sedimentary Geology, 66(3/4): 181-195. https: //doi.org/10.1016/0037-0738(90)90059-3
- Hill, R., 1952. The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate. Proceedings of the Physical Society Section A, 65(5): 349-354. https://doi.org/10.1088/0370-1298/65/5/307
- Hunter, B. E., Davies, D. K., 1979. Distribution of Volcanic Sediments in the Golf Coastal Province-Significance to

Petroleum Geology. *Transactions, Golf Coast Association of Geological Societies*, 29(1): 147-155.

- Keys, R. G., Xu, S. Y., 2002. An Approximation for the Xu-White Velocity Model. *Geophysics*, 67(5): 1406-1414. https://doi.org/10.1190/1.1512786
- Liu, C., Qiao, H. Q., Guo, Z. Q., et al., 2017. Shale Pore Structure Inversion and Shear Wave Velocity Prediction Based on Particle Swarm Optimization (pso) Algorithm. *Progress in Geophysics*, 32(2):689-695(in Chinese with English abstract).
- Mollajan, A., Memarian, H., Quintal, B., 2019. Imperialist Competitive Algorithm Optimization Method for Nonlinear Amplitude Variation with Angle Inversion. *Geophysics*, 84 (3): N81-N92. https://doi.org/10.1190/geo2018-0507.1
- Pan, B. Z., Xue, L. F., Huang, B. Z., et al., 2008. Evaluation of Volcanic Reservoirs with the "QAPM Mineral Model" Using a Genetic Algorithm. *Applied Geophysics*, 5(1): 1–8. https://doi.org/10.1007/s11770-008-0004-8
- Pillar, N., Yan, J., Lubbe, R., 2007. Variable Aspect Ratio Method in the Xu-White Model for AVO.In 69th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EURO-PEC 2007.European Association of Geoscientists & Engineers. cp - 27 - 00230. https://doi.org/10.3997/2214 -4609.201401648
- Qiao, H, Q., 2017. Shear Wave Velocity Prediction Method Based on Improved Particle Swarm Algorithm(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Rajabi, M., Bohloli, B., Gholampour Ahangar, E., 2010. Intelligent Approaches for Prediction of Compressional, Shear and Stoneley Wave Velocities from Conventional Well Log Data: a Case Study from the Sarvak Carbonate Reservoir in the Abadan Plain (Southwestern Iran). *Computers & Geosciences*, 36(5): 647-664. https://doi.org/ 10.1016/j.cageo.2009.09.008
- Ruiz, F., Dvorkin, J., 2010. Predicting Elasticity in Nonclastic Rocks with a Differential Effective Medium Model. *Geophysics*, 75(1): E41-E53. https://doi. org/10.1190/ 1.3267854
- Sohail, G. M., Hawkes, C. D., 2020. An Evaluation of Empirical and Rock Physics Models to Estimate Shear Wave Velocity in a Potential Shale Gas Reservoir Using Wireline Logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 185: 106666. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106666
- Wang, J. W., Du, J. X., Zhang, Y. C., et al., 2019. The Geological Conditions, Resource Potential and Exploration Direction in Nanpu Sag of Jidong Depression, Bohai Bay Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 24(3): 21-28 (in Chinese with English abstract).

- Wang, X.G., 2013. Application of Self-Adaptive BP Neural Network to the Prediction of Shear Wave Velocity. *Lith-ologic Reservoirs*, 25(5): 86-88(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Zhou, X., 1982. Volcanic Petrology. Science Press, Beijing, 47-100(in Chinese).
- Wood, A.B., Lindsay, R.B., 1956. A Textbook of Sound. *Physics Today*, 9(11): 37.https://doi.org/10.1063/1.3059819
- Wu, H.B., Wang, G.C., Hou, Y.P., et al., 2022. Seismic Identification of the Jurassic Volcano-Sedimentary series in the Hailar Basin and Lithofacies Palaeogeography Reconstruction. *Earth Science*, 47(8): 3056-3072(in Chinese with English abstract).
- Xing, G.F., Li, J.Q., Duan, Z., et al., 2021. Mesozoic-Cenozoic Volcanic Cycle and Volcanic Reservoirs in East China. *Journal of Earth Science*, 32(4): 742-765. https:// doi.org/10.1007/s12583-021-1476-1
- Xu, M. M., Yin, X. Y., Zong, Z. Y., et al., 2020. Rock-Physics Model of Volcanic Rocks, an Example from Junggar Basin of China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107003. https://doi.org/10.1016/j. petrol.2020.107003
- Xu, S. Y., White, R. E., 1995. A New Velocity Model for Clay -Sand Mixtures 1. Geophysical Prospecting, 43(1): 91-118. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00126.x
- Xu, S. Y., White, R. E., 1996. A Physical Model for Shear-Wave Velocity Prediction1. *Geophysical Prospecting*, 44 (4): 687-717. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996. tb00170.x
- Yan, J., Li, X. Y., Liu, E. R., 2002. Effects of Pore Aspect Ratios on Velocity Prediction from Well-Log Data. *Geophysical Prospecting*, 50(3): 289-300.
- Yuan, C., Li, J. Y., Chen, X. H., et al., 2016. Quantitative Uncertainty Evaluation of Seismic Facies Classification: a Case Study from Northeast China. *Geophysics*, 81(3): B87-B99. https://doi.org/10.1190/geo2015-0228.1
- Zhang, B., Liu, C., Guo, Z.Q., et al., 2018. Probabilistic Reservoir Parameters Inversion for Anisotropic Shale Using a Statistical Rock Physics Model. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(6): 2601-2617(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Ma, C.Q., Liao, Q., et al., 2009. Geochemistry of Late Mesozoic-Cenozoic Volcanic Rocks in the Huanghua Depression, Bohai Bay: Petrogenesis and Implications for Tectonic Transition. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1159-1177(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. H., Pan, B. Z., Shan, G. Y., et al., 2020. Volcanic Alteration of Nanpu-5 Structure in Bohai Bay Basin: Effects on the Physical Property of Reservoir and Lower Limits of

Physical Property. *Geology and Resources*, 29(4):351-35629(4):6(in Chinese with English abstract).

- Zhang, L. H., 2009. Study on methods of evaluating igneous Reservoir of Logging. Jilin University(Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Zhong, H. R., Wu, Z. Y., et al., 2020. Improvement of Petrophysical Workflow for Shear Wave Velocity Prediction Based on Machine Learning Methods for Complex Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192: 107234. https://doi.org/ 10.1016/j.petrol.2020.107234
- Zhao, H. B., Cheng, D. A., Li, L. L., 2009. Rock Physics Analysis of Deep Volcanic Rocks in Daqing Oilfield Beijing 2009 International Geophysical Conference and Exposition, Beijing, China, 24-27 April 2009. Beijing.
- Zhao, P. F., Liu, P., Ming, J., et al., 2021. Distribution Characteristics of Volcanic Rock in CFD Oilfield and Its Controlling Effect on Reservoir. *Earth Science*, 46(7): 2466-2480(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X, J., 2011. Research on Logging Identification and Evaluation of Deep Volcanic Reservoirs in Nanpu 5th Structure (Dissertation). China University of Petroleum, Qingdao(in Chinese with Englishabstract).
- Zimmermann, G., Burkhard, H., Melchert, M., 1992. Estimation of Porosity in Crystalline Rock by a Multivariate Statistical Approach. *Scientific Drilling*, 3(1-3): 27-35.

#### 附中文参考文献

白俊雨,宋志翔,苏凌,等,2012.基于Xu-White模型横波速度 预测的误差分析.地球物理学报,55(2):589-595.

- 刘财, 乔汉青, 郭智奇, 等, 2017. 基于粒子群算法的页岩孔隙 结构反演及横波速度预测. 地球物理学进展, 32(2): 689-695.
- 乔汉青,2017.基于改进粒子群算法的横波速度预测方法研究 (硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 王德滋,周新民,1982.火山岩岩石学.北京:北京科学出版社, 47-100.
- 王建伟,杜景霞,张永超,等,2019.南堡凹陷石油地质条件、资源潜力及勘探方向.海相油气地质,24(3):21-28.
- 王晓光, 2013. 自适应 BP 神经网络在横波速度预测中的应用. 岩性油气藏, 25(5): 86-88.
- 吴海波,王国臣,侯艳平,等,2022.海拉尔盆地侏罗系火山-沉积岩地震识别和岩相古地理重建.地球科学,47(8): 3056-3072.
- 张冰,刘财,郭智奇,等,2018.基于统计岩石物理模型的各向 异性页岩储层参数反演.地球物理学报,61(6):2601-2617.
- 张超,马昌前,廖群安,等,2009.渤海湾黄骅盆地晚中生代-新生代火山岩地球化学:岩石成因及构造体制转换.岩石 学报,25(5):1159-1177.
- 张丽华,2009.火成岩储层测井评价方法研究(博士学位论文). 长春:吉林大学.
- 张丽华,潘保芝,单刚义,等,2020.渤海湾盆地南堡5号构造火 山岩蚀变对储层物性影响及物性下限.地质与资源,29 (4):351-35629(4):6.
- 赵鹏飞,刘朋,明君,田晓平,刘文超,吕世聪,2021.CFD油 田火山岩展布特征及其对油藏的控制作用.地球科学, 46(7):2466-2480.
- 朱学娟,2011.南堡5号深层火山岩油气藏测井识别与评价技 术研究(硕士学位论文).青岛:中国石油大学(华东).