

基于倾角导向地层格架低频模型的火山岩相控反演研究

齐英涵¹, 曹磊^{1*}, 周丹², 韩娇艳¹, 张红霞¹

1 中国石化东北油气分公司勘探开发研究院, 长春 130062

2 中国石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103

* 通信作者, caol.dbsj@sinopec.com

收稿日期: 2024-08-27; 修回日期: 2024-11-26

摘要 近年来, 众多勘探开发实例彰显出火山岩油气藏巨大的勘探潜力。长岭断陷的中基性火山岩更是展现出极为独特的地质特征, 其横向分布广泛, 纵向呈现多期叠置的复杂态势, 火山机构内部结构错综复杂, 储层的非均质性极为强烈。利用准确的低频模型对储层相控反演加以约束, 成为制约火山岩油气藏高效开发利用的核心关键所在。本文将地震数据作为主变量, 倾角导向等时地层格架作为第一协同变量, 以岩相指示曲线作为第二协同变量, 利用多变量协同克里金方法进行插值得到低频模型, 优选波形指示模拟得到高分辨率火山岩相体。再利用岩相先验控制构建物性参数和弹性参数联合采样空间, 基于贝叶斯-序贯高斯模拟方法实现对火山岩储层的物性预测。本方法充分整合现有条件下不同维度的数据, 有效降低了预测结果的多解性, 支撑龙凤山地区火山岩部署井位 8 口, 物性预测平均吻合率为 81.4%, 充分证明了本方法的可靠性与有效性。

关键词 火山岩; 多变量协同克里金; 低频模型; 相控波形指示反演; 倾角导向

中图分类号: P618.13; TE122

Study of face-controlled inversion of volcanic rocks based on the low-frequency model of dip-steering stratigraphic framework

QI Yinghan¹, CAO Lei¹, ZHOU Dan², HAN Jiaoyan¹, ZHANG Hongxia¹

1 Research Institute of Exploration and Development, Northeast Oil and Gas Branch of SINOPEC, Changchun 130062, China

2 SINOPEC Geophysical Research Institute Company Limited, Nanjing 211103, China

Received: 2024-08-27; Revised: 2024-11-26

Abstract In recent years, numerous exploration and development instances have conspicuously manifested the tremendous exploration potential of volcanic rock oil and gas reservoirs. The intermediate-basic volcanic rocks in the Changling fault depression exhibit highly distinctive geological characteristics, featuring extensive lateral distribution, complex multi-phase superimposition in the vertical direction, intricate internal structures of volcanic edifices, and extremely strong heterogeneity of reservoirs. Employing accurate low-frequency models to constrain the reservoir phase-controlled inversion has emerged as the key factor restricting the efficient development and utilization of volcanic rock oil and gas reservoirs. In this paper, seismic data is taken as the main variable, the dip-oriented isochronous stratigraphic framework as the first collaborative variable, and

引用格式: 齐英涵, 曹磊, 周丹, 韩娇艳, 张红霞. 基于倾角导向地层格架低频模型的火山岩相控反演研究. 石油科学通报, 2025, 10(01): 65-74
QI Yinghan, CAO Lei, ZHOU Dan, HAN Jiaoyan, ZHANG Hongxia. Study of face-controlled inversion of volcanic rocks based on the low-frequency model of dip-steering stratigraphic framework. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 65-74. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.005

the lithofacies indicator curve as the second collaborative variable. The low-frequency model is obtained through interpolation using the multivariate collaborative Kriging method, and the high-resolution volcanic lithofacies body is optimized through waveform indicator simulation. Subsequently, the lithofacies prior control is utilized to construct the joint sampling space of physical properties and elastic parameters, and the physical property prediction of volcanic rock reservoirs is realized based on the Bayesian - Sequential Gaussian Simulation method. This approach fully integrates the data from different dimensions under the existing conditions, effectively reducing the multiplicity of solutions in the prediction results. It supports the deployment of eight well locations in the Longfengshan area, with an average coincidence rate of 81.4% for physical property predictions. This fully substantiates the reliability and validity of this method, laying a solid technical foundation for the subsequent exploration and development work of volcanic rock oil and gas reservoirs.

Keywords volcanics; multivariate collaborative kriging; low frequency model; facies-controlled waveform inversion; dip-steering

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.005

0 引言

常规反演方法识别火山岩储层通常会因为地质模型与地下实际情况差异较大而导致反演结果准确率不高。目前,建立低频模型通常是将井的波阻抗曲线进行低通滤波和内插,包含针对平行于顶层、平行于底层、顶底层之间等比例模式内插的3种算法,适用于平行地层、超覆和尖灭地层。而火山岩内幕结构复杂,横向变化快、非均质性强,以常规方法建立的低频模型约束的反演结果会出现较大误差^[1-4]。火山岩的储层反演的两个关键点:如何建立准确的低频模型“相控”反演以及如何实现。

常规地震反演中建立低频模型常采用分步法反演确定储层分布,由确定性反演确定火山岩岩相,岩相约束随机反演确定优质储层分布,避免了低频模型均质与火山岩地层不符的问题^[5-7]。胡佳等^[8]采用“体控联合相控”的思路,以倾角扫描、相干等属性为约束,在岩性体内反演生成高分辨率密度体,指示优质储层分布。陈人杰等^[9]通过协克里金插值将辅变量信息整合到估计结果提高低频模型精度,为少井区建模提供有效方法。石楠等^[10]采用压实趋势校正法和地震属性约束法联合建立低频模型,实现对研究区薄砂层的识别。Yamatani等^[11]应用伪井合成地质信息加入到模型建立,采用神经网络方法预测岩相。Duan等^[12]结合地震反射特征,以火山喷发相和溢流相约束低频模型,提升火山岩储层预测分辨能力。Fábio等^[13]、Zhao等^[14]利用神经网络训练建立模型,对储层开展反演。Li等^[15]提出一种卷积方法不依赖子波的弹性包络反演,减少对初始模型和低频数据的依赖。Guan等^[16]将叠前AVO为协变量应用贝叶斯克里金方法建立低频模型,实现弹性参数稳定反演。Cao等^[17]采用序贯高

斯联合仿真算法和弹性变形算法进行模拟,丰富地层参数组合模式增加地层纵向组合多样性。

常规的低频建模及反演方法受火山岩内幕反射弱、横向变化快、地层倾角大等因素影响,存在预测结果外推效果差、空间局部地层单元体穿时等问题^[18]。本文针对研究区气藏以构造岩性为主,整体块状分布,内部似层状的特点^[19-21],提出通过多变量协同克里金方法融合倾角导向等时地层格架与火山岩岩相曲线共同构建低频模型,应用波形指示模拟技术得到火山岩相体。并基于贝叶斯-序贯高斯模拟方法应用概率模拟实现对火山岩储层的物性预测。

1 方法原理

协同克里金法^[22]是一种多变量地质统计插值方法,用于通过使用主变量的实验数据和来自与主变量相关的辅助变量的试验数据来生成主变量。针对研究区复杂地质特征,本文选用多变量协同克里金方法利用序贯高斯算法实现贝叶斯-序贯高斯模拟方法,建立低频弹性参数模型。

用 X_{c+o} 表示在计算网格数为 n 的范围内已经模拟 X_c 和正在模拟 X_o 的储层参数值的合集, Y_i 、 Z_i 表示在包含单位 i 的网格内的两种地震属性的均值,满足 $Y_i = \sum_{i=1}^n a_i X_i$ 、 $Z_i = \sum_{i=1}^n b_i X_i$,其中 a 、 b 分别是两种属性的加权系数。存在符合高斯分布的 Y 条件分布的似然函数 $f(Y|X_c, X_o) \equiv f(Y|X_{c+o})$,用 $j \in c+o$ 表示在网格内已模拟和正在模拟的点的合集, $k, l \notin c+o$ 表示其余未访问的网格。则满足第一种属性的条件分布函数 $f(Y|X_{c+o})$ 的均值 m_j 和方差 σ_j^2 可以写成:

$$m_j = \sum_j (a_j + \lambda_j) X_j \quad (1)$$

$$\sigma_f^2 = \sum_k \sum_l a_k a_l C_{kl} - \sum_j \lambda_j \sum_k a_k C_{kj} \quad (2)$$

其中, C_{kl} 和 C_{kj} 分别表示 k 与 l 和 j 点之间的协方差, a_j 是第一种属性在 j 点的加权系数, λ_j 是下式的加权系数, 则有:

$$\sum_j \lambda_j C_{jr} = \sum_k a_k C_{kr}, \forall r \in c+o \quad (3)$$

满足正态分布 Z 的似然函数 $g(Z|X_c, X_o, Y) = g(Z|X_{c+o}, Y)$ 的均值和方差为:

$$m_g = \mu_Y Y + \sum_j (b_j + \mu_j) X_j \quad (4)$$

$$\sigma_g^2 = \sum_k \sum_l b_k b_l C_{kl} - \sum_j \mu_j \sum_k b_k C_{kj} - \mu_Y \sum_k \sum_{m \in 1, \dots, n} a_m b_k C_{mk} \quad (5)$$

其中, 存在 μ_j 和 μ_Y 是下式协同克里金式的加权系数:

$$\sum_j \mu_j C_{jr} + \mu_Y \sum_{m \in 1, \dots, n} a_m C_{mr} = \sum_k b_k C_{kr}, \quad \forall r \in c+o \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \sum_j \mu_j \sum_{m \in 1, \dots, n} a_m C_{mj} + \mu_Y C_{Y,Y} \\ & = \sum_k \sum_{m \in 1, \dots, n} a_m b_k C_{mk} \end{aligned} \quad (7)$$

先验函数 $p(x_o | x_s)$ 是邻近单元已模拟结果 x_s 条件下 x_o 的条件分布, 假设属性 Y 、 Z 的分布仅取决于计算网格内的已知结果, 与临近单元无关, 最终可以得到

$$p(x_o | x_s, Y, Z) \propto N(m_o, \sigma_o^2) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_o & = \left\{ \sigma_f^2 \sigma_g^2 m_{sk} + \sigma_{sk}^2 \sigma_g^2 (a_o + \lambda_o) \times \right. \\ & \left. [Y - \sum_{j \in c} (a_j + \lambda_j) x_j] + \sigma_{sk}^2 \sigma_f^2 (b_o + \mu_o) \times \right. \\ & \left. [Z - \mu_Y Y - \sum_{j \in c} (b_j + \mu_j) x_j] \right\} / d \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $N(m, \sigma^2)$ 为均值 m 和方差 σ^2 的高斯分布结果, 且有:

$$\sigma_o^2 = \sigma_{sk}^2 \sigma_f^2 \sigma_g^2 / d \quad (10)$$

$$\begin{aligned} d & = \sigma_f^2 \sigma_g^2 + (a_o + \lambda_o)^2 \sigma_{sk}^2 \sigma_g^2 + \\ & (b_o + \mu_o)^2 \sigma_{sk}^2 \sigma_f^2 \end{aligned} \quad (11)$$

利用序贯高斯模拟算法和上述公式, 最终实现多相协同克里金插值下的贝叶斯—序贯高斯模拟。

2 地层格架建立

本文采用倾角导向法构建地震格架, 通过建立反演低频模型, 有效提出异常数据与边界干扰, 提升参数建模精度并整合丰富地层信息, 对于地层倾角变化

大的火山岩储层具有更好的适用性。

2.1 地震属性优选

地震几何特征揭示了构造与地层信息, 其中优选的地震倾角特征用于指示同相轴的局部倾斜, 从而指导等时地层划分^[23-24]。在三维地震数据处理中, 体倾角的计算可通过3种主要途径实现: 方法一是通过复地震道解析、方法二是通过梯度构造张量、方法三是以及相干估计结合倾角扫描技术。每种方法都有其独特的计算方式和适用场景^[25-27]。

相较于前两种算法, 方法三在处理复杂地层时表现出更强的稳定性, 避免了方法一中可能出现的奇异值问题。此外, 其在局部倾角计算上的精度也优于方法一。而方法二求取的方向矢量不利于后续沿地震测线方向的小层追踪。因此, 本文最终选用基于相干估计的倾角计算方法。

基于Marfurt等人^[28]提出的三维地震数据倾角扫描方法, 通过计算数据相干性确定最佳倾角。该方法以地震同相轴的倾角范围为基础, 从最小倾角出发, 沿两个正交方向按预设梯度逐步增加倾角值进行估算。通过对时窗内多道数据进行倾角重采样处理, 计算采样前后数据关联度, 完成所有倾角扫描后, 选取相关性最强的两个方向倾角作为估计点的视倾角。运用平行四边形法则, 根据这两个视倾角可计算出真倾角及其倾向。基于第二代相干计算方法, 分析点 (x, y) 位置的相似性 $c(\tau, p, q)$ 计算公式如下:

$$\begin{aligned} c(\tau, p, q) & = \frac{\sum_{k=-K}^{+K} \left\{ \left[\sum_{j=1}^J u(\tau + k\Delta t + p\Delta x_j + q\Delta y_j) \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[\sum_{j=1}^J u^H(\tau + k\Delta t + p\Delta x_j + q\Delta y_j) \right]^2 \right\}}{J \sum_{k=-K}^{+K} \sum_{j=1}^J \left\{ \left[u(\tau + k\Delta t + p\Delta x_j + q\Delta y_j) \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[u^H(\tau + k\Delta t + p\Delta x_j + q\Delta y_j) \right]^2 \right\}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, p 和 q 分别表示 x 和 y 方向的视倾角分量, x_j 和 y_j 是以分析点的第 j 道数据的局部坐标, Δx_j 和 Δy_j 即第 j 道相对于分析点在 x 和 y 方向的偏移距离, J 为分析窗内总道数, K 为时窗内以分析点为中心的上下采样点数量, u 为地震数据, u^H 为其希尔伯特变换。

通过对比实测三维地震主测线的倾角计算结果与地震剖面, 分析视倾角与地震反射同相轴的倾斜度的一致性, 以验证计算准确性。由图1可见, 视倾角真实反映了所示地震主测线540~575道号区间内地震反射同相轴的倾斜特征和起伏形态。通过对比相干剖面

(图1d)可见,反射同相轴连续性较好的区域具有较高的相干性,而连续性较差的区域则表现出较低的相干性,这一现象验证了倾角计算结果的可靠性。

利用倾角扫描方法可精确测定地震同相轴的倾斜程度及横向变化,该方法适用于小层追踪,从而建立与地震同相轴相对应的等时地层结构。

2.2 倾角导向的等时地层格架建立

基于火山岩顶底界面的地震解释结果,从初始道的种子点出发,利用时间参数和局部倾角数据,逐道

推算各小层的时序信息,最终构建出工区等时细分层的倾角导向网格化模型。

倾角导向小层追踪的具体算法如下:

$$Z_{i,j,k} = (Z_{i-1,j,k} + \Delta X \times X_{\text{dip},i-1,j,k} + Z_{i,j-1,k} + \Delta Y \times Y_{\text{dip},i,j,k}) / 2, k = (0, 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中, $Z_{i,j,k}$ 是 (i, j) 位置处第 k 层的时间, ΔX 、 ΔY 和 X_{dip} 、 Y_{dip} 分别为 X 和 Y 方向上的采样间隔和视倾角, 倾角单位为 ms/m 。

通过双向视倾角体导向追踪对工区地震解释层位

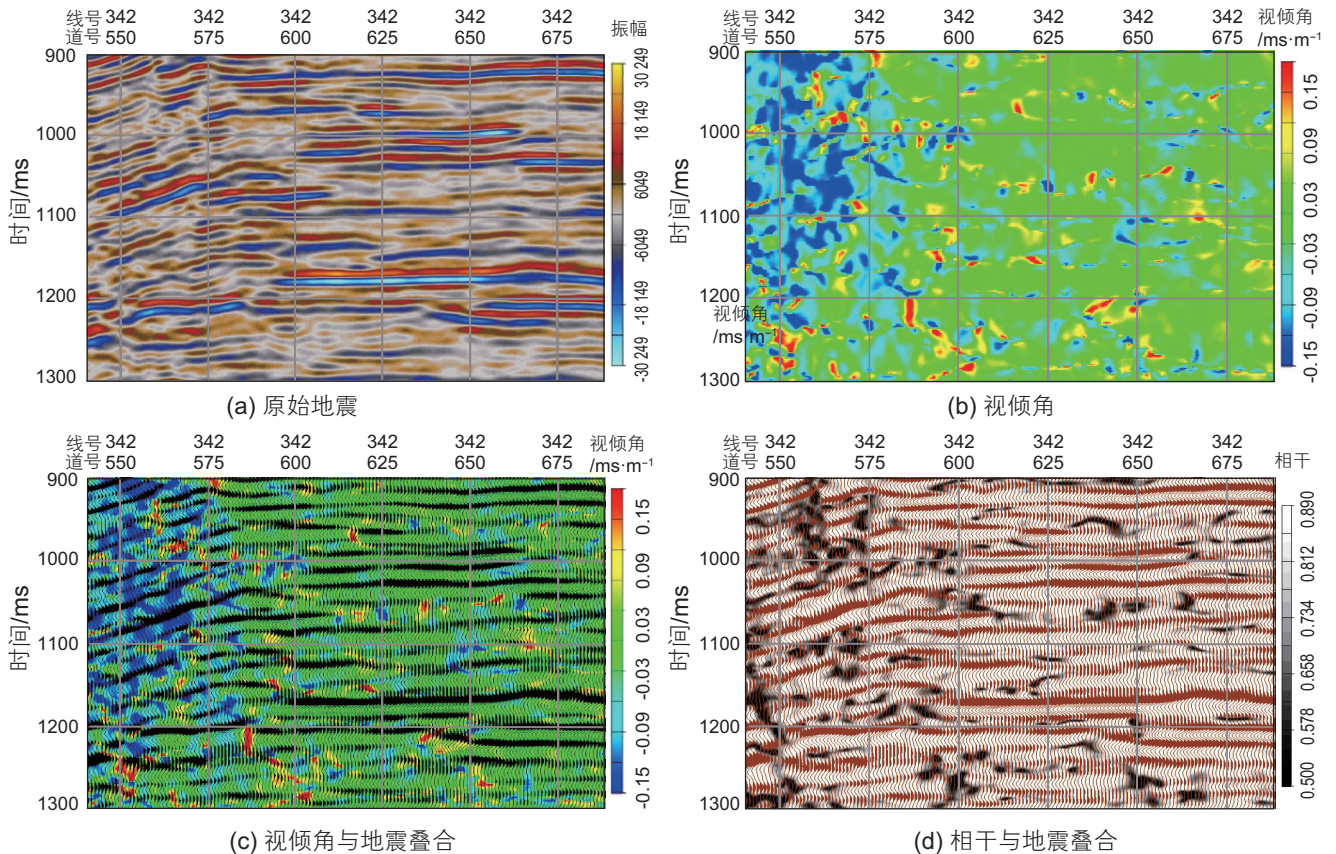


图1 视倾角算法对比剖面图

Fig. 1 Comparison chart of apparent dip profile diagram

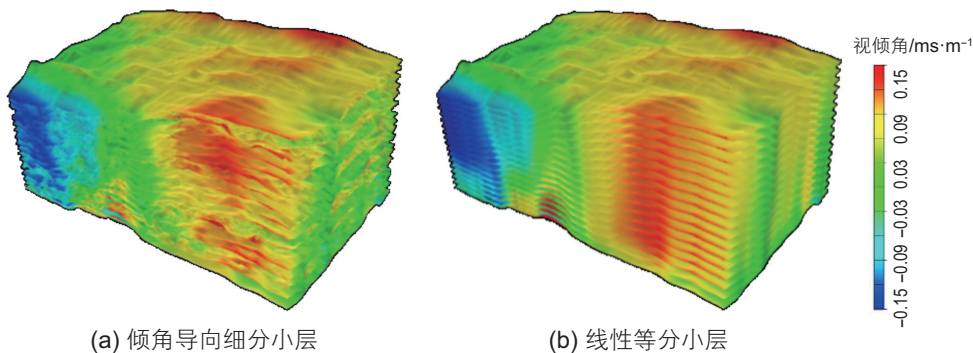


图2 不同细分层位方法对比

Fig. 2 Comparison of different subdivision layer methods

进行精细划分(图 2a), 与传统的线性等分法(图 2b)相比, 线性等分小层呈现出匀称规整的特征, 而倾角导向细分小层在横向维度上表现出较显著的波动和起伏。这种差异表明, 基于倾角导向的层位划分方法能够有效捕捉局部次级构造的特征, 其划分结果更贴近实际地质构造的空间分布规律。

通过将细分小层与地震同相轴进行叠合分析, 可评估其匹配效果。对比图 3 的倾角导向细分与图 4 线性等分结果可见, 线性等分小层在红色箭头处出现明显“穿轴”现象, 而倾角导向方法获得的小层则能更好地追踪同相轴的横向起伏。

为评估倾角导向细分小层的整体追踪效果, 选取图 3 中细分后的 Hor7 及邻近人工解释层位, 该处对应

稳定近水平强振幅同相轴, 分别提取地震振幅属性进行对比。从瞬时振幅切片(图 5)对比分析可见, 采用倾角导向追踪技术获取的小层瞬时振幅特征与人工解释层位的沿层瞬时振幅基本一致。经倾角导向细分后, 小层沿地震同相轴延伸趋势展开, 更贴近等时地层划分特征, 所构建的地层格架能更好地反映火山岩横向非均质性的沉积规律。

3 火山岩相体预测

研究区长岭断陷龙凤山火石岭组为基底之上中性火山岩浆喷发形成的火山岩地层, 其岩相主要发育爆发相、沉积相、喷溢相和火山碎屑沉积岩 4 大类^[29-30]。

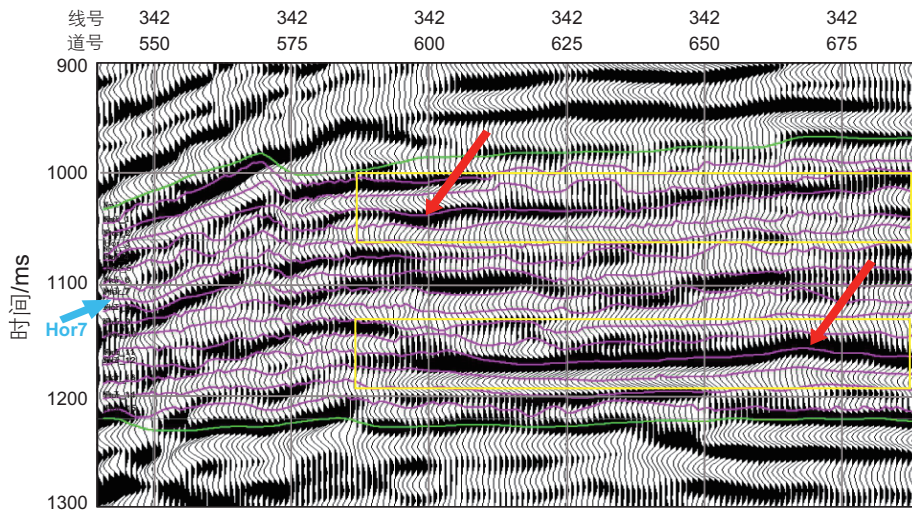


图 3 地震与倾角导向细分小层叠合剖面

Fig. 3 Seismic and dip-steering subdivision of small layered composite profiles

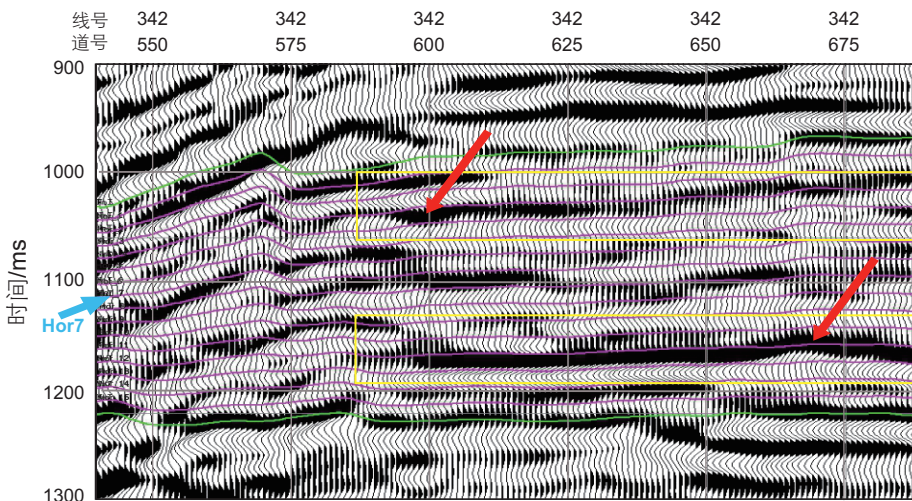


图 4 地震与线性等分小层叠合剖面

Fig. 4 Seismic and linear subdivision layered composite profile

根据不同岩相速度和放射性的差异，构建岩相指示曲线AC/GR对4种岩相进行划分，如图6所示。通过多口井岩相指示曲线和岩相的对比分析，岩相指示曲线对沉积相、喷溢相和爆发相区分明显，火山碎屑沉积岩相与火山沉积相均含有外来陆源碎屑物质，泥质含

量较高，具有同样的值域^[31]。

将地震数据作为主变量，倾角导向等时地层格架作为第一协同变量，以岩相指示曲线作为第二协同变量，利用多变量协同克里金方法进行插值计算，获得各小层上所有待估计点的参数值作为多源数据融合结

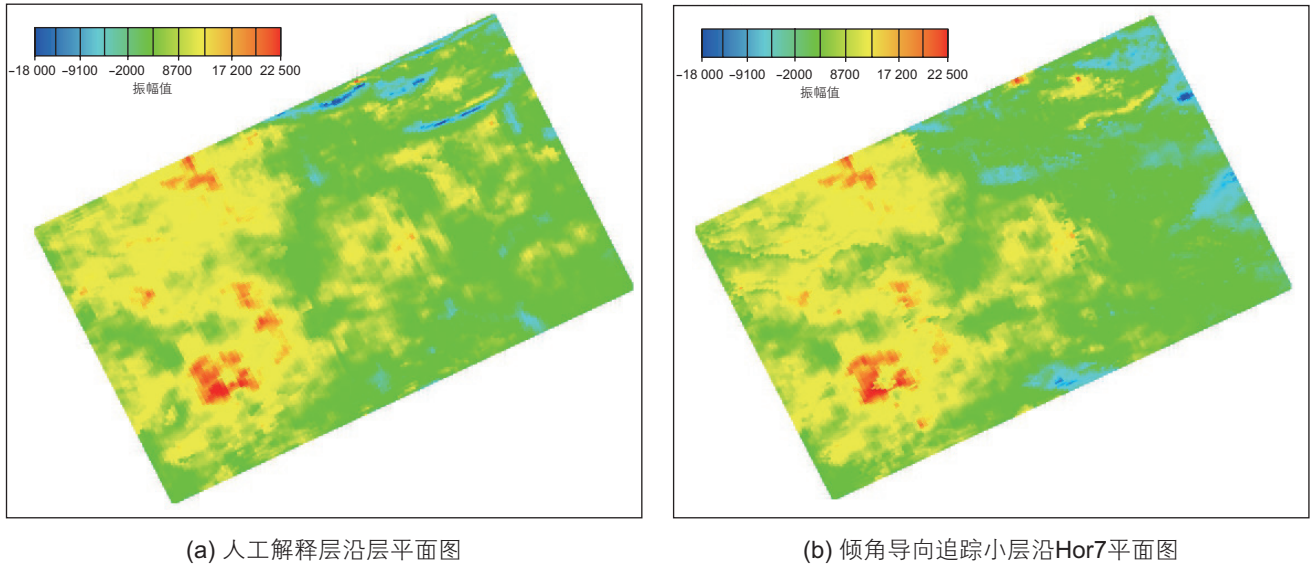


图5 瞬时振幅属性对比图

Fig. 5 Instantaneous amplitude attribute comparison chart

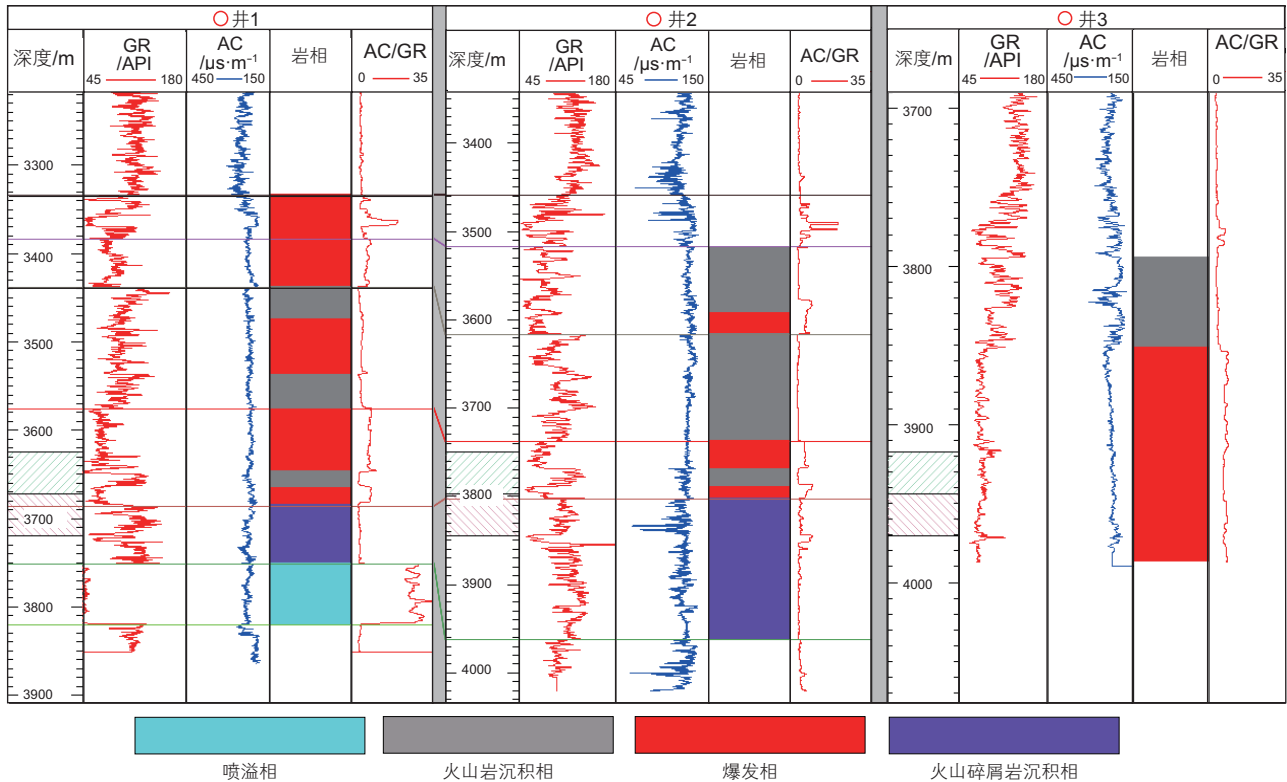


图6 龙凤山地区火山岩岩相指示曲线拟合对比图

Fig. 6 Comparison of fitting curves of volcanic rock lithology indicators in Longfengshan area

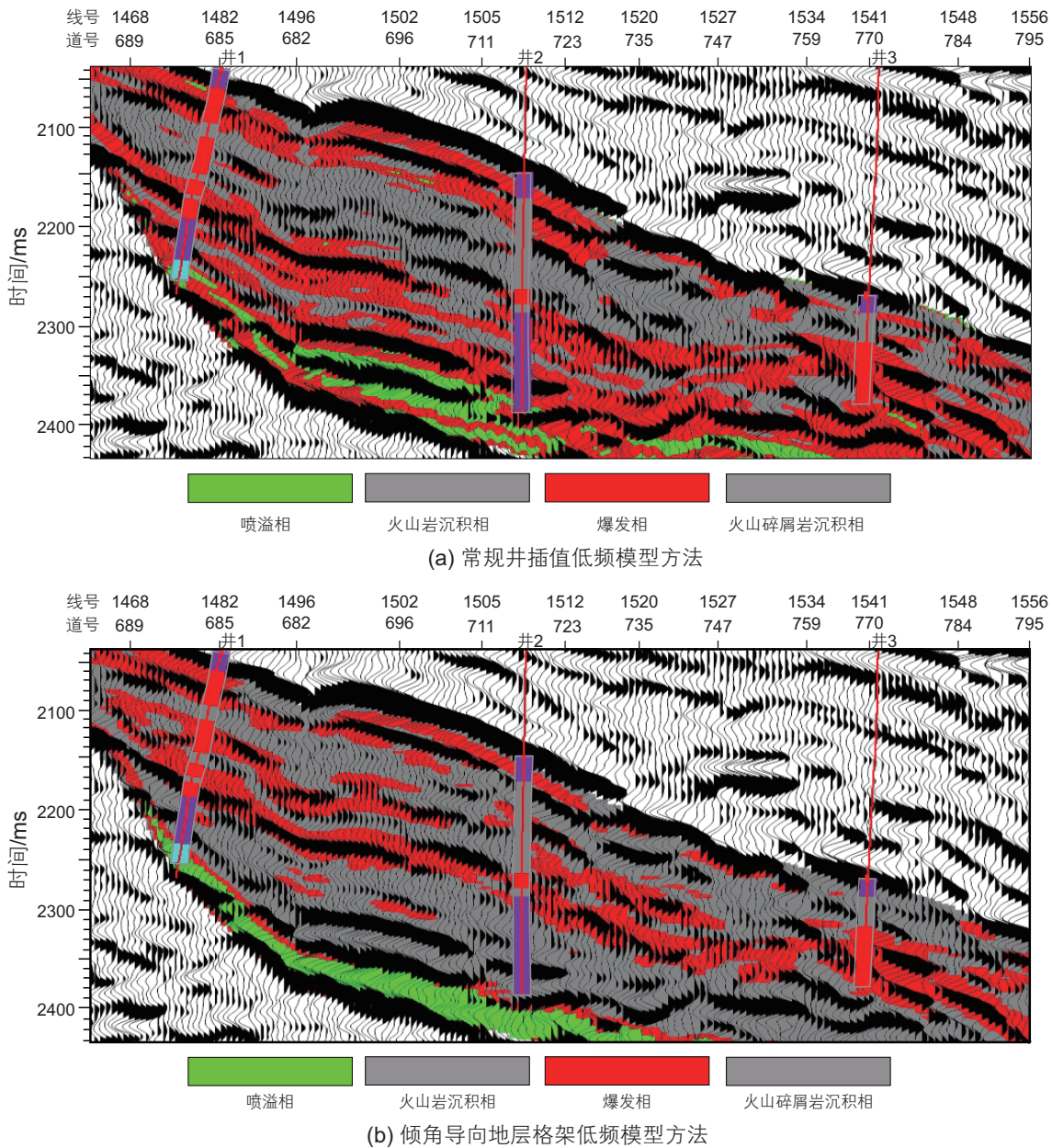


图 7 火山岩相体预测结果连井剖面图
 Fig. 7 Prediction results of volcanic facies body connected well profile

果，概率化处理后得到低频模型，并以此低频模型为约束进行波形指示模拟得到火山岩相体。选用地震波形指示模拟算法能够充分利用地震波形的横向变化来反应储层空间的相变特征，且对井位分布的均匀性没有严格要求^[32]。

与常规基于井插值的低频模型通过波形指示模拟出的火山岩相结果(图 7a)对比，基于倾角导向地层格架低频模型的波形指示模拟得到的火山岩相结果(图 7b)与测井岩相解释结果对应性有显著提高，统计符合率达到 85.3%。本地区火山岩具有似层状展布特征，有利岩相以爆发相为主，根据岩心、薄片、成像测井

综合确定，爆发相主要在目的层段横向展布。通过波形指示模拟出的火山岩相体提取目的层段的爆发相厚度平面图(图 8)，爆发相火山岩成间歇式喷发，喷发中心自北向南迁移，喷发规模逐渐减弱，主要分布在断层东西两侧。

4 相控物性预测

火山岩相控特征显著，不同岩相存在不同的弹性参数和物性参数的分布特征。由此针对不同岩相，开展统计岩石物理分析，获取不同岩相对应的岩石物理

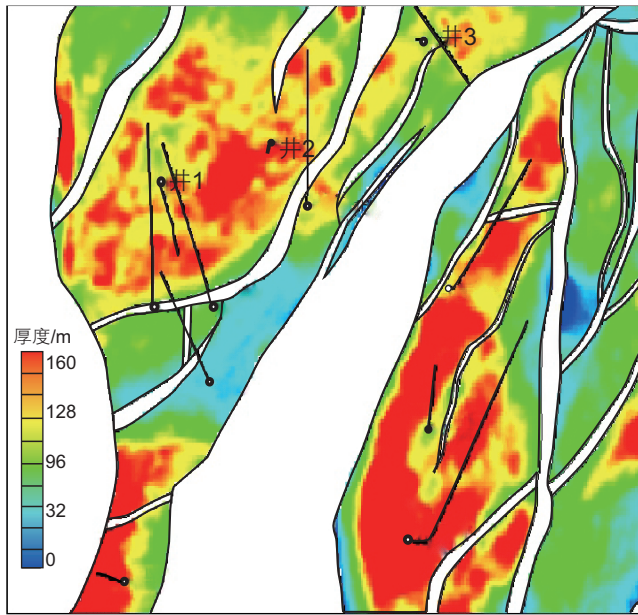


图8 目的层爆发相厚度平面图

Fig. 8 Plan of explosive phase thickness in the target layer

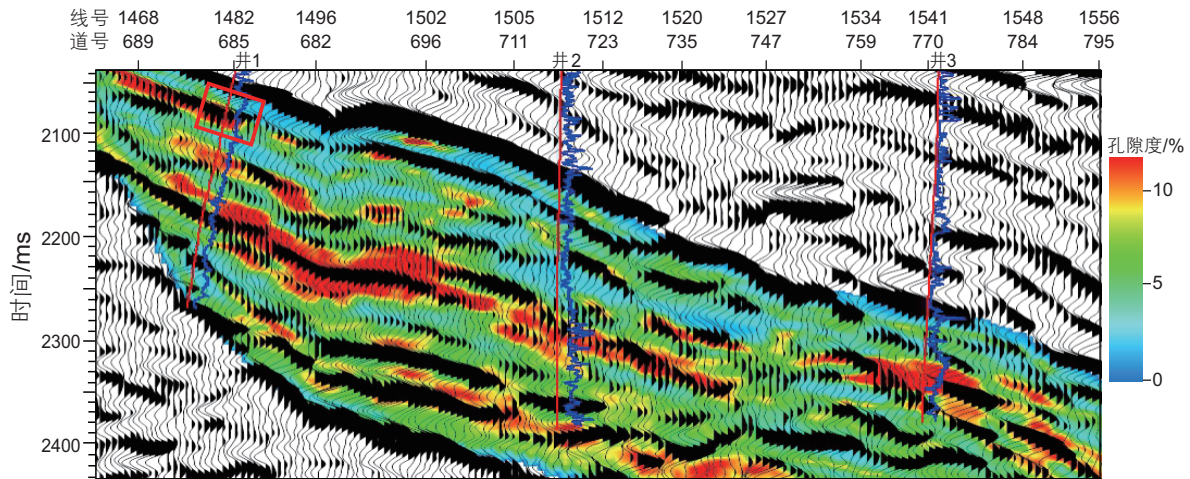


图9 物性预测连井剖面图

Fig. 9 Physical property prediction and well profile diagram

5 结论

1) 基于相干估计的倾角计算方法得到倾角导向体, 引导剖分的小层更接近于等时地层, 求取的变网格地层格架更加符合实际火山岩地质沉积规律。

2) 应用倾角导向地层格架为第一协同变量、火山岩相体为第二协同变量, 利用同位多相协同克里金方

统计特征。本文采用火山岩相体控制下的贝叶斯—序贯高斯模拟方法在工区开展孔隙度预测。基于贝叶斯蒙特卡洛方法在构建物性参数、弹性参数联合采样空间时加入岩相进行先验控制, 不同相采用不同联合采样空间, 利用井数据作为硬数据, 地震数据作为软数据, 从而进行相控多属性序贯高斯模拟, 充分应用现有数据条件下不同维度与域的数据, 减少结果的多解性。

火山岩爆发相储层主要表现为高孔隙度、低密度特征。图9为本地区火石岭组火山岩孔隙度预测连井剖面图, 图中井上蓝色曲线为孔隙度曲线。结合图7b可以看出高孔区域主要发育在爆发相内, 且3口井在目的层段孔隙度均较为发育, 平均在8%~10%, 井1(红色框)为爆发相岩相特征, 孔隙度也较为发育, 平均为9%, 与已钻井基本一致。应用物性预测结果支撑本地区火山岩井位部署8口, 统计15口井预测结果, 平均吻合率为81.4%。

法进行插值构建反演低频模型的方法适用于横向变化快、非均质性强的火山岩储层低频模型建立, 具有一定的推广性。

3) 采用火山岩分相岩石物理分析, 并在火山岩相体控制下开展贝叶斯—序贯高斯模拟进行孔隙度预测, 较常规高斯分布更贴近火成岩地质特征, 真正实现了火山岩储层的相控反演。

参考文献

- [1] 马良涛, 范廷恩, 王宗俊, 等. 不同地质条件下反演低频模型构建方法分析[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 625-635. [MA L T, FAN T G, WANG Z J, et al. Analysis on construction method of inversion low frequency model under different geological conditions[J].

- Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 625–635.]
- [2] 刘炳杨. 低频建模技术研究及其在AVO反演中的应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013. [LIU B Y. Research of low frequency modeling method and its application in AVO inversion[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.]
- [3] 叶云飞, 崔维, 张益明, 等. 低频模型对波阻抗反演结果定量解释的影响[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 32–36. [YE Y F, CUI W, ZHANG Y M, et al. Impacts of low-frequency models on the quantitative interpretation of acoustic impedance inversion[J]. China Offshore Oil Gas, 2014, 26(6): 32–36.]
- [4] 许艳秋, 文晓涛, 郝亚炬, 等. 低频信息对阻抗反演的影响分析[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 78–82. [XU Y Q, WEN X T, HAO Y J, et al. Effect analysis of low frequency on acoustic impedance inversion[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(1): 78–82.]
- [5] 曹磊, 张达, 李宁, 等. 马尔可夫随机场反演在火山岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2021, 60(1): 167–174. [CAO L, ZHANG D, LI N, et al. Application of Markov random field inversion in the prediction of volcanic reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(1): 167–174.]
- [6] 杨晓利, 王方鲁, 张明. 两步相控反演火山岩及围岩储层预测—以南堡2号构造为例[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1640–1649. [YANG X L, WANG F L, ZHANG M, Facies-controlled inversion in the prediction of volcanic rock and surrounding reservoir with near offset stack seismic: A case study in No.2 structure of Nanpu sag[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1640–1649.]
- [7] 王伟, 李炳颖, 黄鑫, 等. 迭代法建立的低频模型在储层反演中的应用[J]. 中国地质调查, 2021, 8(1): 125–133. [WANG W, LI B Y, HUANG X, et al. Application of Iteration method to build low-frequency model in reservoir inversion[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(1): 125–133.]
- [8] 胡佳, 黄棱, 王丽丽, 等. GeoEast解释系统在松辽盆地王府断陷火山岩储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(S1): 148–153. [HU J, HUANG L, WANG L L, et al. Volcanic-faulted reservoir prediction in Wangfu Depression, Songliao Basin with GeoEast[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(S1): 148–153.]
- [9] 陈人杰, 徐乐意, 刘灵, 等. 基于协克里金技术的陆相地层反演低频模型构建方法[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1595–1601. [CHEN R J, XU L Y, LIU L, et al. A low frequency model construction method for continental strata inversion based on co-kriging technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1595–1601.]
- [10] 石楠, 刘源, 冷玥, 等. 基于低频模型优化的相控地质统计学反演方法及应用[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(3): 375–382. [SHI N, LIU Y, LENG Y, et al. Facies-controlled geostatistical inversion method based on low-frequency model optimization and its application[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(3): 375–382.]
- [11] TAKASHI Y, SHUICHI D. Lithofacies prediction from seismic data using deep learning: A case study from North West Shelf Australia[J]. The Leading Edge, 2023, 42(11): 773–781.
- [12] DUAN W B, ZHANG B J, XIONG X J. Seismic characterization and lithology identification of igneous reservoirs: A case study, Junggar Basin[C]. 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition, Madrid, 2022.
- [13] FERNANDES D, EBERTON R, TEIXEIRA L, et al. Cycle-consistent convolutional neural network for seismic impedance inversion: An application for high-resolution characterization of turbidities reservoirs[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 235(3): 212709.
- [14] ZHAO D F, YANG N X, XIONG J L, et al. Model-constrained and data-driven double-supervision acoustic impedance inversion[J]. Petroleum Science, 2023, 20(5): 2809–2821.
- [15] LI F, LI X Z, REN T, et al. Source-independent elastic envelope inversion using the convolution method[J]. Frontiers in Earth Science, 2023. DOI: 10.3389/feart.2023.1259710.
- [16] GUAN X W, MENG Q, JIANG C J, et al. Application of facies controlled prestack inversion technology in prediction of deep tight gas in continental faulted basin[J]. Geofluids, 2022, (6): 1–10.
- [17] CAO D P, SS Y Q, CUI R A. Multi-parameter pre-stack seismic inversion based on deep learning with sparse reflection coefficient constraints[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 209(3): 109836.
- [18] 程慧. 基于地震资料的地质建模及效果评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009. [CHRNG H. Geological Modeling Based on Seismic Data and Its Effect Evaluation[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.]
- [19] 任宪军. 松辽盆地长岭断陷盆缘陡坡带中性火山岩相模式及其对储层的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 816–828. [REN X J. Faces model of intermediate volcanic rocks in steep slope and its control on resevoirs: A case study in Changling fault depression, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 816–828.]
- [20] 苗长盛, 徐文, 刘玉虎, 等. 松辽盆地南部火山岩储层特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 635–643. [MIAO C S, XU W, LIU Y H, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in southern Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 635–643.]
- [21] 唐华凤, 王璞珺, 李瑞磊, 等. 松辽盆地断陷层火山机构类型及其气藏特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 583–589. [TANG H F, WANG P J, LI R L, et al. Classification of volcanic edifices and its characteristics of gas pool in faulted sequence of the

- Songliao Basin, NE China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 583–589.]
- [22] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246–1266.
- [23] BAHORICH M, FARMER S. 3-D Seismic Discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. [J] The Leading Edge, 1995, 14(10): 1053–1058.
- [24] 李炳颖. 沉积模式约束下的地震驱动建模方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012. [LI B Y, The Study of seismic-driven geological modeling constrained by sedimentary model[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [25] 王伟健. 复合砂体叠合模式约束下的地震驱动建模[D]. 成都: 西南石油大学, 2016. [WANG W J, Seismic Drive modeling under the constraint of composite sand body superposition mode[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2016.
- [26] 付雷, 田晓冬, 闫庆学, 等. 相干体技术在三维地震资料中的应用[J]. 世界地质, 2000, 19(3): 270–281. [FU L, TIAN X D, YAN Q X, et al. The technique of the coherence cube in 3-D seismic data[J]. Global Geology, 2000, 19(3): 270–281.]
- [27] 苑书金. 地震相干体技术的研究综述[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(1): 7–16. [YUAN S J, A review of seismic coherence techniques [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(1): 7–16.]
- [28] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L, et al. 3-D Seismic Attributes Using a Semblance-Based Coherency Algorithm [J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150–1165.
- [29] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型, 特征和储层意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(4): 449–456. [WANG P J, CHI Y L, LIU W Z, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4): 449–456.]
- [30] WANG P J, CHEN S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499–523.
- [31] 赵文智, 邹才能, 冯志强, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 129–142. [ZHAO W Z, ZOU C N, FENG Z Q, et al. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanics gas reservoirs, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2008, 35(2): 129–142.]
- [32] 陈彦虎, 毕建军, 邱小斌, 等. 地震波形指示反演方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1149–1158. [CHEN Y H, BI J J, QIU X B, et al. A method of seismic meme inversion and its application[J]. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 2020, 47(6): 1149–1158.]

(编辑 付娟娟)

第一作者: 齐英涵(1997年—) 硕士, 助理研究员, 从事地震属性及反演等储层预测研究, qiyh.dbsj@sinopec.com。

通讯作者: 曹磊(1982年—) 硕士, 副研究员, 从事地震正演、地震属性及反演等储层预测研究, caol.dbsj@sinopec.com。