

郑轩,宗兆云,付亚群,等. 海域油气盖层叠前地震反演预测方法及应用. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2128-2141. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240255.

Zheng Xuan, Zong Zhaoyun, Fu Yaqun, et al. Pre-Stack Seismic Inversion Prediction Method and Application for Marine Oil and Gas Cap Rocks. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (6): 2128 - 2141. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240255.

海域油气盖层叠前地震反演预测方法及应用

郑 轩¹,宗兆云¹,付亚群²,骆 坤¹

1.中国石油大学(华东)地球科学学院,山东 青岛 266580

2.中国石油化工股份有限公司勘探分公司,成都 610041

摘要:盖层对有效储层刻画、储层质量评估和油气藏开发具有重要意义。现有的海域地震预测方法主要针对储层,缺乏对盖层空间展布的研究与分析,亟需建立海域油气盖层叠前地震反演预测方法,为海域油气盖层的地震预测提供技术支撑。因此,本文提出一种基于岩石物理约束的海域盖层岩相以及物性参数叠前地震预测方法,对海域盖层岩相以及物性参数的地震描述进行深入研究。首先,通过海域地层的岩石物理建模分析,优选海域油气盖层岩相以及物性敏感弹性参数。其次,基于岩石物理模型,分别推导岩相敏感参数以及物性参数直接表征的地震反射系数方程和弹性阻抗方程,为海域盖层岩相的空间展布地震刻画和物性参数的地震预测提供技术支撑。为了解决模型参数之间的相关性导致反演结果不稳定的问题,在地震预测过程中通过奇异值分解方法实现模型参数的去相关性,并在贝叶斯反演理论的框架下分别推导海域盖层敏感弹性参数、物性参数的反演目标函数。将该方法应用于实际资料,结果表明泊松阻抗预测精度可以达到95%,孔隙度预测精度可以达到85%,验证了海域油气盖层叠前地震反演预测方法的合理性与有效性。

关键词:海域油气;盖层;孔隙度;泊松阻抗;叠前反演;岩石物理模型

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240255

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

Pre-Stack Seismic Inversion Prediction Method and Application for Marine Oil and Gas Cap Rocks

Zheng Xuan¹, Zong Zhaoyun¹, Fu Yaqun², Luo Kun¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China

2. Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China

Abstract: Cap rocks are of great significance for effective reservoir characterization, reservoir quality assessment, and oil and gas reservoir development. The existing marine seismic prediction methods

收稿日期:2024-09-24

作者简介:郑轩(1998—),男,博士研究生,主要从事油气地球物理理论方法与应用等方面的研究,E-mail: b23010048@s.upc.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42174139,41974119,42030103);崂山实验室科技创新计划(LSKJ202203406)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42174139, 41974119, 42030103) and the Laoshan Laboratory Science and Technology Innovation Program (LSKJ202203406)

mainly focus on reservoirs, lacking research and analysis on the spatial distribution of cap rocks. It is urgent to establish a pre-stack seismic inversion prediction method for marine oil and gas cap rocks to provide technical support for the seismic prediction of marine oil and gas cap rocks. Therefore, this paper proposes a pre-stack seismic prediction method for marine cap rock facies and physical property parameters based on rock physics constraints, and conducts an in-depth study on the seismic description of marine cap rock facies and physical property parameters. First, through the rock physics analysis of marine strata, the marine oil and gas cap rock facies and physical property sensitive elastic parameters are optimized. Secondly, based on the rock physics model, the seismic reflection coefficient equation and elastic impedance equation directly characterized by the lithofacies sensitive parameters and physical property parameters are derived respectively, providing technical support for the seismic characterization of the spatial distribution of the marine cap rock facies and the seismic prediction of the physical property parameters. In order to solve the problem of unstable inversion results caused by the correlation between model parameters, the singular value decomposition method is used to realize the decorrelation of model parameters in the seismic prediction process, and the inversion objective functions of sensitive elastic parameters and physical parameters of marine cap rocks are derived respectively under the framework of Bayesian inversion theory. This method is applied to actual data to verify the rationality and effectiveness of the pre-stack seismic inversion prediction method for marine oil and gas cap rocks. The results show that the Poisson impedance prediction accuracy can reach 95%, and the porosity prediction accuracy can reach 85%.

Key words: marine oil and gas; caprocks; porosity; Poisson impedance; pre-stack inversion; rock physics model

0 引言

盖层作为海域有利油气储层形成的重要环节,对海域油气运移、聚集以及成藏都有显著的影响^[1-2]。针对盖层的地震预测方法研究,能够为海域有效储层的地震勘探开发提供重要的技术基础。盖层的非渗透性特征对易挥发的油气具有重要的保护以及封盖作用,但目前对海域盖层的地震识别与预测方面涉及较少^[3],亟待开展海域盖层的地震反演方法研究,为海域有利储层地震勘探提供技术支撑。

盖层在海域油气勘探开发中的研究地位越发突出,同时也面临着一些亟待解决的难题。我国海域大型油气田成藏模式复杂^[4]。近年来,湖相、海相、海陆过渡相储盖组合方式以及有利储盖控富集、构造脊-盖层控运等多种成藏模式被提出并成功指导了海域油气的勘探与开发^[5]。在珠江口盆地珠三凹陷,由于太平洋板块俯冲减弱、海底扩张逐渐停止以及构造活动较弱等因素,沉积了稳定的浅海泥岩盖层。近期在珠江口盆地的新近系储层中,发现了可能为沉积成因的钙质砂岩夹层^[6],使得泥岩和钙质

砂岩成为该海域盖层的主要成分。在渤海湾盆地,大气田的勘探开发一直是研究的重点目标,其区域盖层为古近系下部厚层泥岩,其成岩程度高、封堵能力强的特征,有助于渤海湾盆地大气田的形成^[7]。南海北部大陆边缘琼东南盆地有利油气聚集带也拥有较好的储盖组合条件^[8],近期研究表明,断层封堵失效、盖层欠发育等原因成为了探井过程中的重要阻碍^[9]。因此,形成有效的海域盖层叠前地震反演预测方法,对我国海域油气增储上产具有重要意义。

20世纪70年代以前,人们很少关注盖层。80年代以来,随着复杂油气藏勘探开发需求的增多,盖层的研究成果日益丰富。1984年,Downey^[10]首先指出复杂油气勘探开发过程不应忽视盖层,应从微观和宏观两个角度评估油气盖层,以降低勘探风险。1981年,Grunau^[11]对盖层进行了广泛的地质调查,指出扩散速率和裂缝的形成与演化是盖层评价的重要参数。1993年,张树林等^[12]系统地介绍了盖层的封闭能力和评价盖层的方法,确定了包括盖层厚度、平面展布、塑性、孔隙流体压力、排驱压力、渗透率等12个主要盖层评价参数,并给出了盖层的分类方

法。而后,付广等^[13-14]丰富了盖层封闭性理论,并利用钻井、测井和分析测试资料对盖层类型、识别标志、分布及封闭能力进行了系统研究。Wu 等^[15]基于密封强度指数,实现了对井上油气盖层封闭性的定量评估。以上研究受限于一维油井提供的盖层封闭能力等信息,无法准确估计盖层平面展布。近年来,利用地震资料评估盖层密封性逐渐成为盖层研究的重点。2009 年,Davis 等^[16]利用时移多分量地震资料探测了科罗拉多州鲁利森气田盆地中心气藏内的封闭性。2010 年,Nourollah 等^[17]运用地震叠后属性指示了封闭性。后来,Nourollah 等^[18]开发了一种利用地震各向异性研究页岩层序封闭潜力的方法。但是,目前利用地震资料评估盖层的方法具有局限性:一方面,依赖于叠后地震数据处理的质量及准确性,叠后地震属性精度较低,可能不适用于复杂地质结构和速度变化较大的区域;另一方面,地震各向异性方法适用于具有各向异性特征的页岩,而不适用于其他盖层类型,例如具有非常小孔喉的致密硬石膏、钙质夹层等。目前,地质-测井-实验室分析测试相结合的盖层综合评价方法已经逐渐成熟,但仍缺少地球物理方法如地震反演技术在盖层识别方面的运用,特别针对海域油气盖层空间展布预测的成功案例比较匮乏。

地震反演是预测地下岩性及其空间展布的重要手段,为盖层的预测提供了有利的工具。相较机器学习等方法对测井数据质量和数量依赖较大的特点^[19],地震反演方法更适合海域油气勘探初期少井的情况。基于弹性阻抗反演的参数预测是目前应用较多的地震反演方法^[20-21]。1999 年,Connolly^[22]首先提出了弹性阻抗的概念。Whitcombe 等^[23]提出了扩展弹性阻抗的概念,扩大了弹性阻抗的定义域。在此之后,基于弹性阻抗反演的参数预测方法被广泛提出和运用。王保丽等^[24]推导了拉梅参数表征的弹性阻抗方程,实现了基于弹性阻抗的拉梅参数直接反演;宗兆云等^[25]在此基础上将拉梅参数表征的弹性阻抗方程应用于碳酸盐岩缝洞型储层流体检测中,并取得了良好的效果;李超等^[26]提出了基于入射角的弹性阻抗方程并建立了相应的弹性阻抗反演方法;张广智等^[27]通过纵横波速度弹性阻抗联合反演,得到了较为稳定的密度;马妮等^[28]基于方位弹性阻抗反演得到了各向异性参数并预测了地应力。此外,各类反演算法为线性、非线性方程反演奠定了有利基础。李博南等^[29]基于频变 AVO

(amplitude variation with offset)理论,采用遗传算法实现了裂缝密度和流体时间尺度因子的同步非线性反演;邓炜等^[30]基于逆算子估计算法实现了 Zoeppritz 方程高阶近似式的非线性反演;印兴耀等^[31-32]基于贝叶斯理论实现了时频域联合反演,并将高斯混合模型与序贯指示模拟相结合,准确地将离散变量进行归类。

针对海域油气盖层岩相刻画和盖层物性参数地震识别难度大以及地震预测稳定性差等问题,本文提出一种基于岩石物理约束的海域盖层岩相以及物性参数叠前地震预测方法,分别从岩相预测以及物性预测两个角度,对海域盖层的地震描述进行深入研究。首先,在岩石物理的基础上,优选岩相以及物性敏感参数,推导由盖层敏感参数直接表征的弹性阻抗方程,为海域盖层敏感参数的地震直接反演奠定理论基础;另外,通过建立针对海域油气盖层预测的岩石物理模型,得到孔隙度与弹性阻抗的定量关系,为直接预测盖层的物性参数展布规律提供解决方法。然后,在贝叶斯反演理论的框架下分别推导海域盖层岩相敏感弹性参数、物性参数的反演目标函数,预测海域油气盖层的横向展布。最后,通过实际资料的应用验证海域油气盖层叠前地震反演预测方法的合理性与有效性。

1 技术方法

1.1 海域盖层岩相叠前地震反演

岩相的类型和分布可以帮助预测海域油气盖层的横向展布及连续性等特征。通过了解岩石的物理属性和分布,可以更准确地定位油气储层的位置,从而提高勘探的成功率,降低钻探的风险和成本。盖层的岩相特征直接影响油气藏的封闭性,进而影响油气的保存。通过地震预测可以评估盖层岩相的连续性、厚度和岩性,从而判断其作为有效封闭层的能力,避免油气泄漏。构建盖层岩相的反演目标函数是地震反演过程中的关键,主要涉及将地震数据与岩石物理模型相结合,并通过优化算法来求解地下岩相分布的最优解。首先基于岩石物理分析,优选岩相敏感参数;其次,建立岩相敏感参数表征的反射系数及弹性阻抗方程;最后,建立反演目标函数,通过概率化算法实现盖层岩相的地震预测。特别地,由于与传统 AVO 反演相比,弹性阻抗反演具有更好的稳定性^[22],因此通过稀疏脉冲方法和道积分反演弹性阻抗数据体。并且,为了保证地震反演的稳

定性,采取奇异值分解方法实现模型参数的去相关性。具体技术流程如图 1 所示。

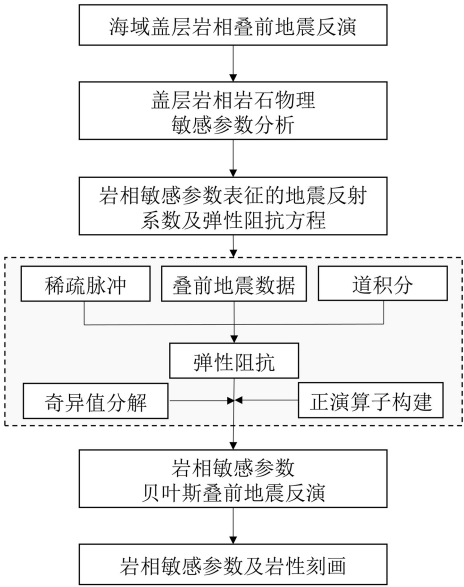


图 1 海域盖层岩相叠前地震反演流程

Fig.1 Procedure of pre-stack seismic inversion of marine cap rock lithofacies

盖层岩相预测的首要任务是岩石物理敏感参数分析,这为后续的反演提供依据。使用我国南海某海域油田的数据对盖层敏感岩石物理参数进行识别和排序。该工区具有有利储盖控富集的油气成藏模式,发育了多期、多种类型的储盖组合,盖层主要包括浅湖相泥岩、潮坪泥岩、浅海相泥岩以及主力储层中普遍发育的钙质砂岩夹层。研究该工区对海域油气盖层敏感参数的确定具有重要指导意义。相关数据参考“2.1 岩石物理分析”的实际测井资料。我们通过确定盖层岩相与其他岩相在各种岩石物性参数中的差异,直观地显示每个岩石物性参数对盖层的敏感性。岩性差异越高,代表该参数对盖层越敏感,能够更好地区分盖层。图 2 展示了各种弹性参数对盖层的敏感性分析,其中泊松阻抗的岩性差异最高(图 2),表明该参数区分钙质砂岩的能力较好,泊松阻抗对盖层的敏感性最高;这表明,与常规纵横波速度、密度、弹性阻抗、纵波阻抗等相比,泊松阻抗在盖层预测中更具优势。

Zong 等^[33]推导了基于泊松阻抗的纵波(P 波)近似反射系数方程:

$$R_{pp}(\theta)=\left(\frac{1}{4}\sec^2\theta-2k\sin^2\theta\right)\frac{\Delta I_Y}{I_Y}+\left[\frac{1}{4}\sec^2\theta\cdot\frac{(2k-3)(2k-1)^2}{k(4k-3)}+2k\sin^2\theta\frac{1-2k}{3-4k}\right]\frac{\Delta I_P}{I_P}+\left[\frac{1}{2}-\frac{1}{4}\sec^2\theta\frac{4k(2k^2-3k+2)-3}{4k^2-3k}+4k\sin^2\theta\frac{2-3k}{3-4k}\right]\frac{\Delta\rho}{\rho}。$$

式中: R_{pp} 为 P 波反射系数; θ 为入射角; I_Y 为杨氏阻抗; k 为横波速度与纵波速度之比的平方; Δ 表示变化量。当波阻抗变化较小时,以下近似是合理的:

$$R_{pp}\approx\frac{1}{2}\frac{\Delta I_e}{I_e}\approx\frac{1}{2}\Delta\ln I_e。$$

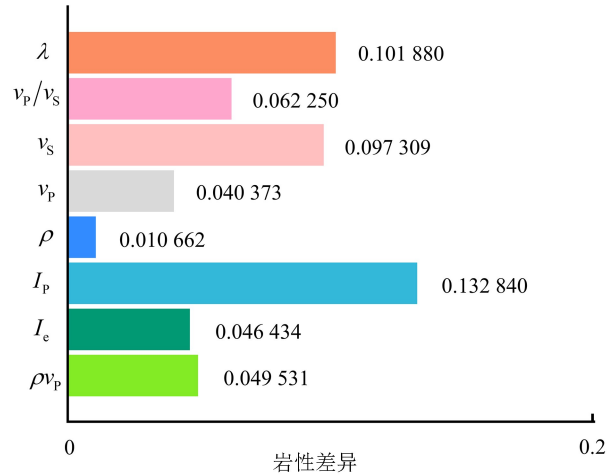
由式(1)(2)得

$$I_e(\theta)=I_Y^{a(\theta)}I_P^{b(\theta)}\rho^{c(\theta)}。$$

其中:

$$\begin{cases} a(\theta)=\frac{1}{2}\sec^2\theta-4k\sin^2\theta; \\ b(\theta)=\frac{1}{2}\sec^2\theta\frac{(2k-3)(2k-1)^2}{k(4k-3)}+4k\sin^2\theta\frac{1-2k}{3-4k}; \\ c(\theta)=1-\frac{1}{2}\sec^2\theta\frac{4k(2k^2-3k+2)-3}{4k^2-3k}+8k\sin^2\theta\frac{2-3k}{3-4k}。 \end{cases}$$

式(3)表示了杨氏阻抗、泊松阻抗、密度与弹性阻抗之间的非线性指数关系。为了方便求解,式(3)



λ, 拉梅常数; v_P , 纵波速度; v_S , 横波速度; ρ , 密度; I_P , 泊松阻抗; I_e , 弹性阻抗。

图 2 不同弹性参数对盖层的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of different elastic parameters to cap rocks

被标准化并简化为线性形式：

$$\ln \frac{I_e}{I_{e0}} = \left(\frac{1}{2} \sec^2 \theta - 4k \sin^2 \theta \right) \frac{I_Y}{I_{Y0}} + \left[\frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{(2k-3)(2k-1)^2}{k(4k-3)} + 4k \sin^2 \theta \frac{1-2k}{3-4k} \right] \frac{I_P}{I_{P0}} + \left[1 - \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{4k(2k^2-3k+2)-3}{4k^2-3k} + 8k \sin^2 \theta \frac{2-3k}{3-4k} \right] \frac{\rho}{\rho_0} \quad (5)$$

式中， I_{e0} 、 I_{Y0} 、 I_{P0} 和 ρ_0 分别为弹性阻抗、杨氏阻抗、泊松阻抗和密度的平均值。通过三个不同入射角度的弹性阻抗可构建弹性阻抗与杨氏阻抗、泊松阻抗和密度的关系：

$$\begin{cases} \ln \frac{I_e(\theta_1)}{I_{e0}} = a(\theta_1) \frac{I_Y}{I_{Y0}} + b(\theta_1) \frac{I_P}{I_{P0}} + c(\theta_1) \frac{\rho}{\rho_0}; \\ \ln \frac{I_e(\theta_2)}{I_{e0}} = a(\theta_2) \frac{I_Y}{I_{Y0}} + b(\theta_2) \frac{I_P}{I_{P0}} + c(\theta_2) \frac{\rho}{\rho_0}; \\ \ln \frac{I_e(\theta_3)}{I_{e0}} = a(\theta_3) \frac{I_Y}{I_{Y0}} + b(\theta_3) \frac{I_P}{I_{P0}} + c(\theta_3) \frac{\rho}{\rho_0}. \end{cases} \quad (6)$$

假设地层的反射系数序列是稀疏分布的，则估计弹性阻抗的目标函数可以写成

$$J = \min \{ L_1^1(\mathbf{r}_{\text{EI}}) + \alpha_1 L_2^2[\mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{m})] + \alpha_2 L_2^2(\mathbf{t} - \mathbf{I}_e) + \alpha_3 L_2^2(\nabla \mathbf{I}_e) \}. \quad (7)$$

式中： L_i^j ($i=1,2, j=1,2$) 代表 i 范数的 j 次方； $\mathbf{r}_{\text{EI}}$ 为弹性阻抗反射系数； α_j ($j=1,2,3$) 为权重系数； $\mathbf{d}$ 为实际地震记录； $\mathbf{G}(\mathbf{m})$ 为合成地震记录； $\mathbf{m}$ 为速度、密度等各种与地震传播相关的参数； $\mathbf{t}$ 为弹性阻抗低频模型； $\mathbf{I}_e$ 为弹性阻抗； $\nabla \mathbf{I}_e$ 为测井计算得到的弹性阻抗梯度。通过求解式(7)获得弹性阻抗反射系数，再利用道积分得到最终的弹性阻抗：

$$I_e = I_{e0} \exp \left(\int_{t_0}^t r(\tau) d\tau \right). \quad (8)$$

式中： I_{e0} 为初始弹性阻抗； t 为采样时间； t_0 为初始时间。

为了解决模型参数之间相关性导致反演结果不稳定的问题，采用奇异值分解方法实现模型参数的去相关^[34]。假设模型参数的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} \sigma_{m_1}^2 & \sigma_{m_1 m_2} & \sigma_{m_1 m_3} \\ \sigma_{m_2 m_1} & \sigma_{m_2}^2 & \sigma_{m_2 m_3} \\ \sigma_{m_3 m_1} & \sigma_{m_3 m_2} & \sigma_{m_3}^2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中： $\sigma_{m_i}^2$ 为方差； $\sigma_{m_i m_j}$ 为协方差。通过奇异值分解可以写成

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{u} \mathbf{\Sigma} \mathbf{u}^T = \mathbf{u} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & \\ & \sigma_2^2 & \\ & & \sigma_3^2 \end{bmatrix} \mathbf{u}^T. \quad (10)$$

式中： $\mathbf{u}$ 为由特征向量组成的单位正交矩阵； $\mathbf{\Sigma}$ 为包含奇异值平方的对角矩阵； σ_1^2 、 σ_2^2 、 σ_3^2 为奇异值的平方。稀疏协方差矩阵可以写为

$$\mathbf{e}^{-1} = \begin{bmatrix} e_{11} & 0 & \cdots & e_{12} & 0 & \cdots & e_{13} & 0 & \cdots \\ 0 & e_{11} & 0 & \cdots & e_{12} & 0 & \cdots & e_{13} & 0 \\ & & & \vdots & & & & & \\ e_{21} & 0 & \cdots & e_{22} & 0 & \cdots & e_{23} & 0 & \cdots \\ 0 & e_{21} & 0 & \cdots & e_{22} & 0 & \cdots & e_{23} & 0 \\ & & & \vdots & & & & & \\ e_{31} & 0 & \cdots & e_{32} & 0 & \cdots & e_{33} & 0 & \cdots \\ 0 & e_{31} & 0 & \cdots & e_{32} & 0 & \cdots & e_{33} & 0 \\ & & & \vdots & & & & & \end{bmatrix}_{2t \times 2t} \quad (11)$$

因此，地球物理问题的正演算子可以写成

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}' \mathbf{R}'. \quad (12)$$

其中：

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} \mathbf{e}; \mathbf{R}' = \mathbf{e}^{-1} \mathbf{R}. \quad (13)$$

式中： $\mathbf{A}'$ 为去相关待反演参数系数矩阵； $\mathbf{R}'$ 为去相关待反演参数矩阵。

贝叶斯反演方法是一种基于概率与统计的不确定性参数估计方法。该方法利用待反演参数的先验分布信息，通过求解模型参数的后验概率实现模型参数的预测，在处理线性和非线性反演问题中应用较广。贝叶斯公式可以表示为^[35]

$$P(\mathbf{R}' | \mathbf{S}) = \frac{P(\mathbf{R}') P(\mathbf{S} | \mathbf{R}')}{\int P(\mathbf{R}') P(\mathbf{S} | \mathbf{R}') d\mathbf{R}'} \propto p(\mathbf{R}') P(\mathbf{S} | \mathbf{R}'). \quad (14)$$

式中： $P(\mathbf{R}' | \mathbf{S})$ 为后验概率； $P(\mathbf{R}')$ 为待估计参数的先验分布； $P(\mathbf{S} | \mathbf{R}')$ 为似然函数； $\int P(\mathbf{R}') P(\mathbf{S} | \mathbf{R}') d\mathbf{R}'$ 为观测样本的全概率，可近似为常数。为提高反演的稳定性，可假设待估计参数满足柯西分布^[36]：

$$P_{\text{Cauchy}}(\mathbf{R}') = \frac{1}{(\pi \sigma_m)^N} \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{1 + R_i'^2 / \sigma_m^2} \right). \quad (15)$$

式中： σ_m^2 为模型参数的方差； N 为待估计参数的数量； R_i' 为 $\mathbf{R}'$ 的第 i 个分量。假设似然函数符合高

斯分布, σ_n^2 是随机噪声的方差, 则似然函数可表示为

$$P(\mathbf{S} | \mathbf{R}') \propto \exp\left[-\frac{(\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S})^T(\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S})}{2\sigma_n^2}\right]。 \quad (16)$$

综合式(14)(15)(16), 待反演参数的后验概率可表示为

$$P(\mathbf{P}' | \mathbf{S}) \propto \exp\left[-\sum_{i=1}^N \ln(1 + R_i'^2/\sigma_m^2)\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S})^T(\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S})}{2\sigma_n^2}\right]。 \quad (17)$$

将模型约束加入式(17), 并求取其最大值可得到估计杨氏阻抗、泊松阻抗、密度的最终目标函数:

$$F = (\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S})^T(\mathbf{A}'\mathbf{R}' - \mathbf{S}) + 2\sigma_n^2 \sum_{i=1}^N \ln(1 + R_i'^2/\sigma_m^2) + B\left[\frac{1}{2} \ln \frac{R'(t)}{R'(t_0)} - \int_{t_0}^t R'(\tau) d\tau\right]。 \quad (18)$$

式中, B 为模型参数的约束系数。通过迭代重加权最小二乘方法^[37]求解式(18), 即可得到最终解。

1.2 基于岩石物理的盖层物性参数叠前地震反演

现有研究缺少针对海域油气盖层的理论岩石物理模型, 难以充分反映盖层弹性阻抗与物性参数的关系。因此基于岩石物理建模, 充分利用工区的实际地质特征, 最大程度地得到弹性阻抗与物性参数之间的关系。以下简述岩石物理建模过程:

第一步, 计算各向同性岩石基质等效弹性模量。经调研, 研究工区的矿物以黏土、石英、钾长石、方解石为主, 含少量白云石。采用 V-R-H 平均模型^[38]计算岩石基质等效弹性模量:

$$M_{VRH} = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n M_i f_i + \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i}{M_i} \right)^{-1} \right]。 \quad (19)$$

式中: M_{VRH} 为岩石基质等效弹性模量; M_i 为第 i 种固体矿物的弹性模量; f_i 为第 i 种矿物的体积分数; n 为固体矿物的数目。

第二步, 耦合孔隙, 形成背景骨架。采用 KT 模型^[39]进行孔隙耦合, 通过形状因子控制孔隙的纵横比:

$$(K_{KT}^* - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_{KT}^* + \frac{4}{3}\mu_m} = \sum_{i=H/S} x_i (K_i - K_{KT}^*) P^{mi}; \quad (20)$$

$$(\mu_{KT}^* - \mu_m) \frac{\mu_m + \zeta_m}{\mu_{KT}^* + \zeta_m} = \sum_{i=H/S} x_i (\mu_i - \mu_{KT}^*) Q^{mi}。 \quad (21)$$

其中:

$$\zeta_m = \frac{\mu_m}{6} \frac{9K_m + 8\mu_m}{K_m + 2\mu_m}。 \quad (22)$$

式中: K_{KT}^* 和 μ_{KT}^* 分别为有效介质的体积模量和剪切模量; K_m 和 μ_m 分别为基质的体积模量和剪切模量; S 和 H 分别为在孔隙压力下形变的软孔隙和不宜形变的硬孔隙; x_i 为包含物材料 i 的体积分数; K_i 和 μ_i 分别为包含物的体积模量和剪切模量; P^{mi} 和 Q^{mi} 分别为与包含物模量和形状有关的极化因子, 描述在基质中加入包含物材料 i 后的效果。

第三步, 利用含流体孔隙介质理论添加孔隙流体, 形成含流体孔隙岩石。各向异性情况下的流体替换公式^[40]是 Gassmann 方程的各向异性形式:

$$S_{ijkl}^{dry} - S_{ijkl}^{sat} = \frac{(S_{ijaa}^{dry} - S_{ijaa}^{sat})(S_{kaaa}^{dry} - S_{klaa}^{sat})}{(S_{aa\beta\beta}^{dry} - S_{aa\beta\beta}^{sat}) + (\beta_{fl} - \beta_m)\varphi}。 \quad (23)$$

式中: S_{ijkl} 为岩石的柔度; β 为可压缩量; 角标 sat、dry、m 和 fl 分别代表饱和岩石、干骨架、基质和流体; φ 为孔隙度。当岩石骨架满足各向同性假设时, 式(23)可以写成:

$$\begin{cases} K_{sat}^{-1} = K_{dry}^{-1} - \frac{(K_{dry}^{-1} - K_m^{-1})^2}{\varphi(K_i^{-1} - K_\varphi^{-1}) + (K_{dry}^{-1} - K_m^{-1})}; \\ \mu_{sat}^{-1} = \mu_{dry}^{-1} - \frac{(\mu_{dry}^{-1} - \mu_m^{-1})^2}{\varphi(\mu_i^{-1} - \mu_\varphi^{-1}) + (\mu_{dry}^{-1} - \mu_m^{-1})}。 \end{cases} \quad (24)$$

式中: K_{sat} 、 μ_{sat} 分别为饱和岩石的体积模量和剪切模量; K_{dry} 、 μ_{dry} 分别为干骨架的体积模量和剪切模量; K_i 、 μ_i 分别为第 i 种孔隙填充材料的体积模量和剪切模量; K_φ 、 μ_φ 分别为孔隙空间的体积模量和剪切模量。

因此, 饱和流体岩石的纵、横波速度可表示为:

$$v_p = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho}}; \quad (25)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho}}。 \quad (26)$$

基于上述地震岩石物理模型, 将孔隙度等物性参数表征的饱和流体岩石弹性参数代入归一化弹性阻抗方程, 可得到孔隙度等物性参数与弹性阻抗的定量关系。其中, 物性参数中孔隙度对弹性阻抗和 AVO 反射系数的贡献度最大^[41], 因此可以利用地震

数据对盖层孔隙度进行定量地震预测,采取贝叶斯反演方法,算法与前文类似。具体步骤如图 3 所示。

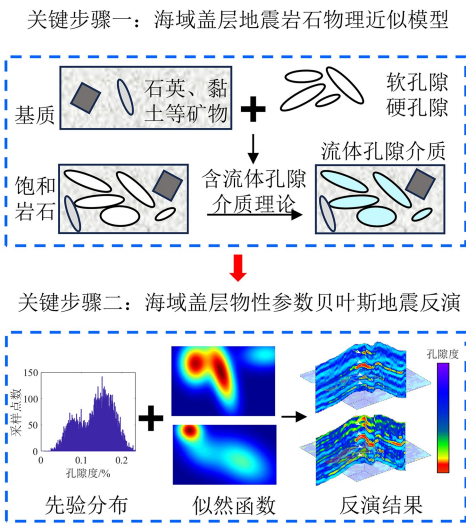


图 3 海域盖层物性参数贝叶斯地震预测方法流程
Fig.3 Procedure of Bayesian seismic prediction method for physical property parameters of marine cap rocks

2 应用实例

2.1 岩石物理分析

岩石物理分析是优选盖层敏感参数的重要手段。以中国南海某海域工区的实际测井资料为例，

图 4 显示了工区内井上岩性解释结果及物性参数真实值。从井上选取具有代表性的一组储盖组合，即“a 盖层 - b 储层 - c 盖层”，可以看出：储层以砂岩为主，孔隙度较高；盖层以泥岩、钙质砂岩为主，孔隙度较低。

图 5 显示了工区内井上弹性参数的真实值，可以看到：可能由于地层压实等作用，一些弹性参数的值随着深度的增加而逐渐增加，这会降低反演结果的可解释性；而随着深度的增加，泊松阻抗未受压实左右而显著变小，有助于提高岩性判别的可靠性。另外，可以看出：在 a 盖层、b 储层和 c 盖层位置，纵波速度、密度、纵波阻抗、弹性阻抗规律不清晰，盖层同时对应着各参数的高值与低值，难以有效区分储层与盖层；而泊松阻抗对盖层有着较好的敏感性，主要表现为储层泊松阻抗较低、盖层泊松阻抗较高。

为了验证泊松阻抗识别盖层的可靠性，图 6a、b 分别定量展示了泊松阻抗与方解石体积分数和泥质体积分数的岩性交会图，可以看出，泊松阻抗可以较好地区分盖层（蓝色、黑色）和储层（黄色）。图 6c 展示了泊松阻抗与弹性阻抗的岩性交会图，可以看出，泊松阻抗识别盖层的能力明显高于弹性阻抗。图 6d 展示了泊松阻抗与孔隙度的岩性交会图，可以看出，盖层具有低孔隙度和高泊松阻抗的特征。因此，可以采取通过泊松阻抗岩相刻画、孔隙度定量预测相结合的方法对海域油气盖层进行识别。

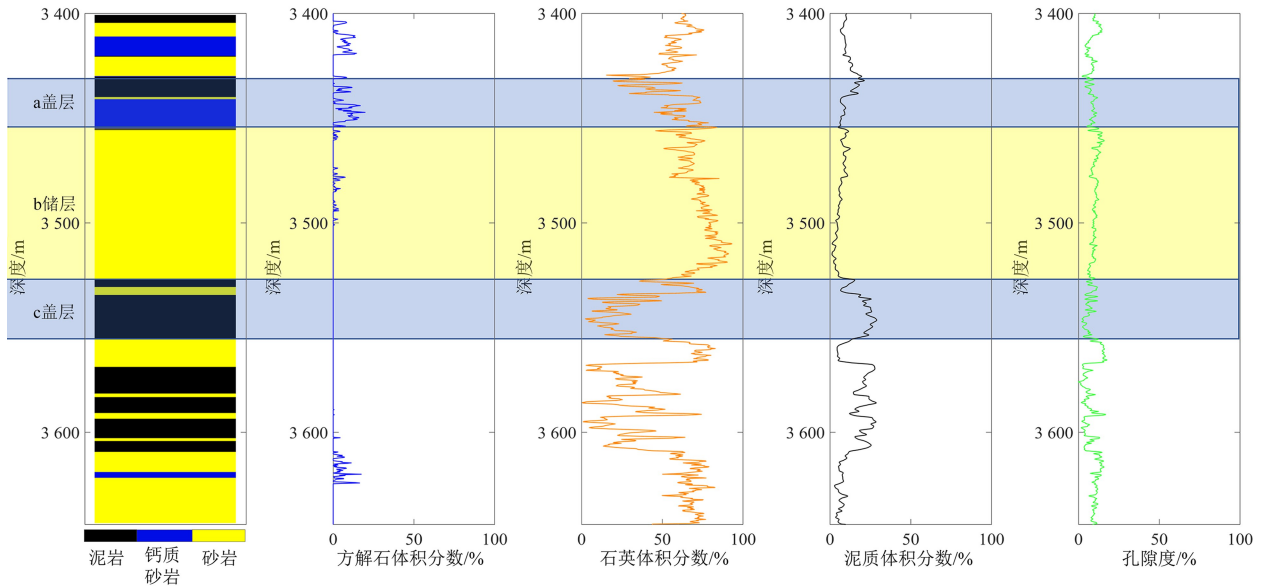


图 4 工区内井上岩性解释及物性参数真实值
Fig.4 Lithology interpretation and real physical parameter values of well curve in the field area

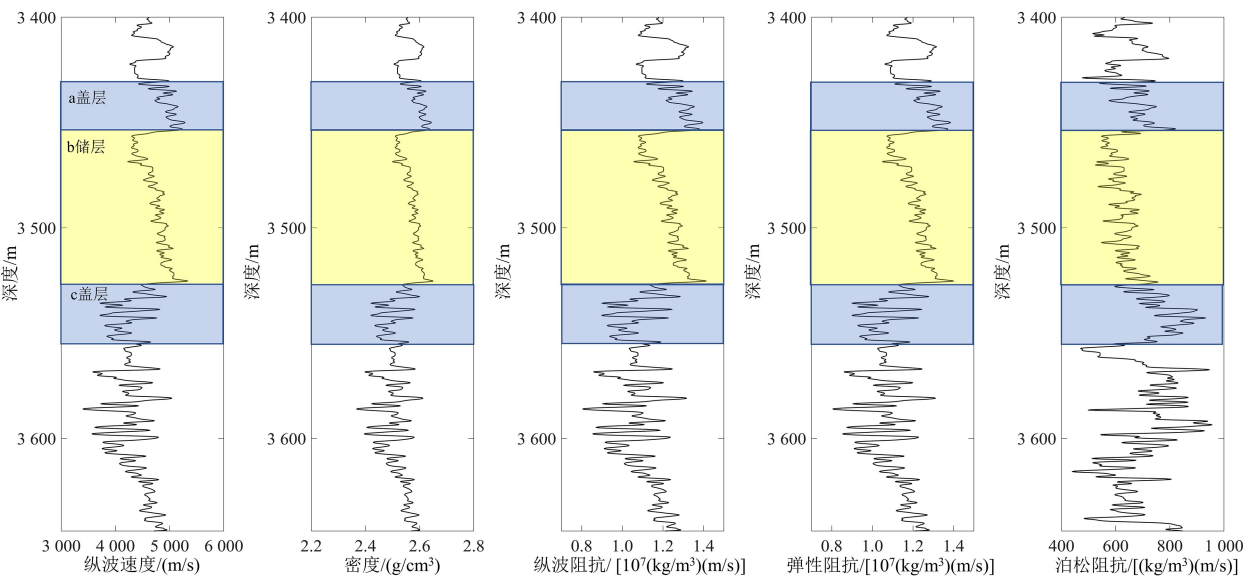


图 5 工区内井上弹性参数真实值

Fig.5 Real elastic parameter values of well curve in the field area

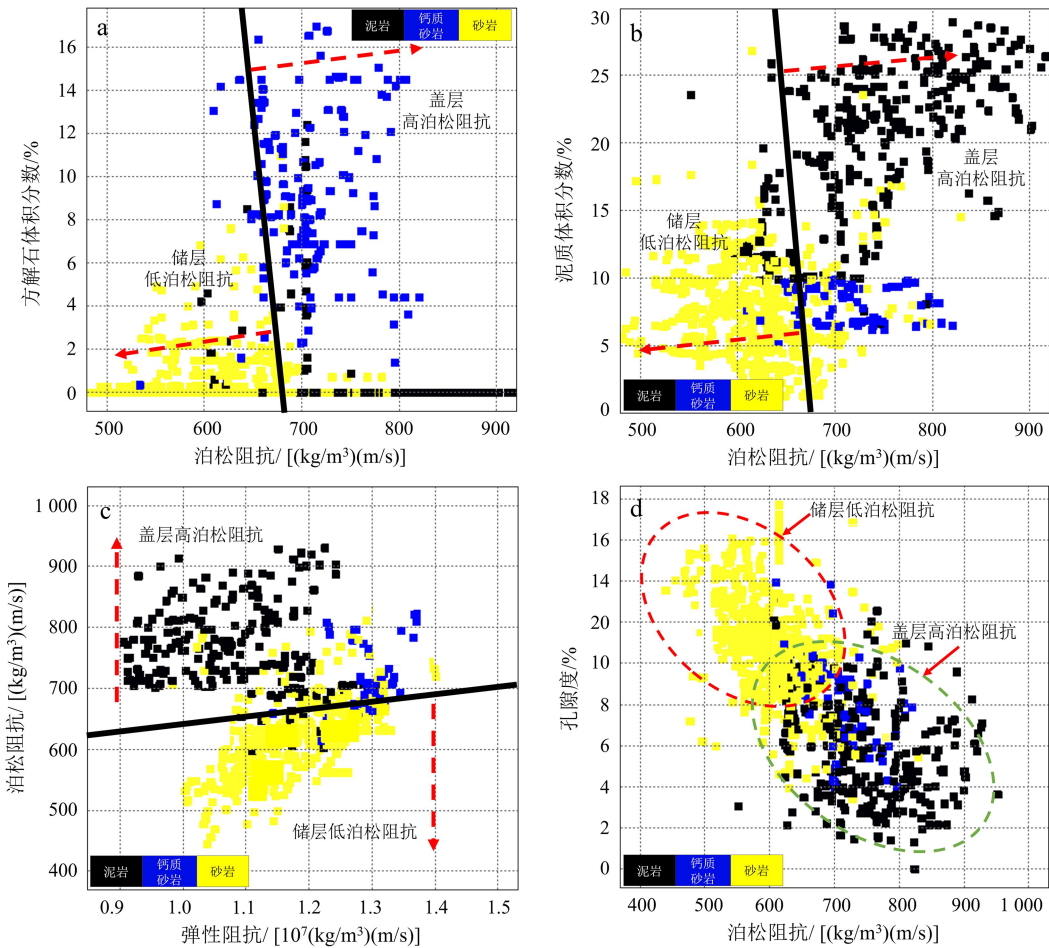


图 6 工区内井上参数统计交会对比分析

Fig.6 Comparative analysis of statistical intersection of well parameters in the field area

2.2 海域盖层叠前地震反演预测方法的应用

常规泊松阻抗反演方法利用泊松阻抗与弹性阻抗之间的统计关系进行反演,或通过纵横波速度与密度的提取计算泊松阻抗,存在物理意义不明确、统计性关系适用范围较小及误差累计等问题。针对这些问题,依据前文建立的泊松阻抗;表征的弹性阻抗方程,直接反演得到泊松阻抗。该方法物理意义明确、试用范围大、累计误差小。在海域盖层物性参数

预测方面,依据前文建立的针对海域油气盖层预测的岩石物理模型,得到弹性阻抗与物性参数之间的定量关系,并基于弹性阻抗实现孔隙度反演。

为了验证本文提出的海域油气盖层叠前地震反演预测方法的适用性,将该方法应用于中国南海海域某工区。图 7 为过 A 井和 B 井的三个角度部分叠加地震剖面。其中:A 为已知井,根据测井岩性解释,已知存在三个较好盖层;B 井是验证井,是盖层

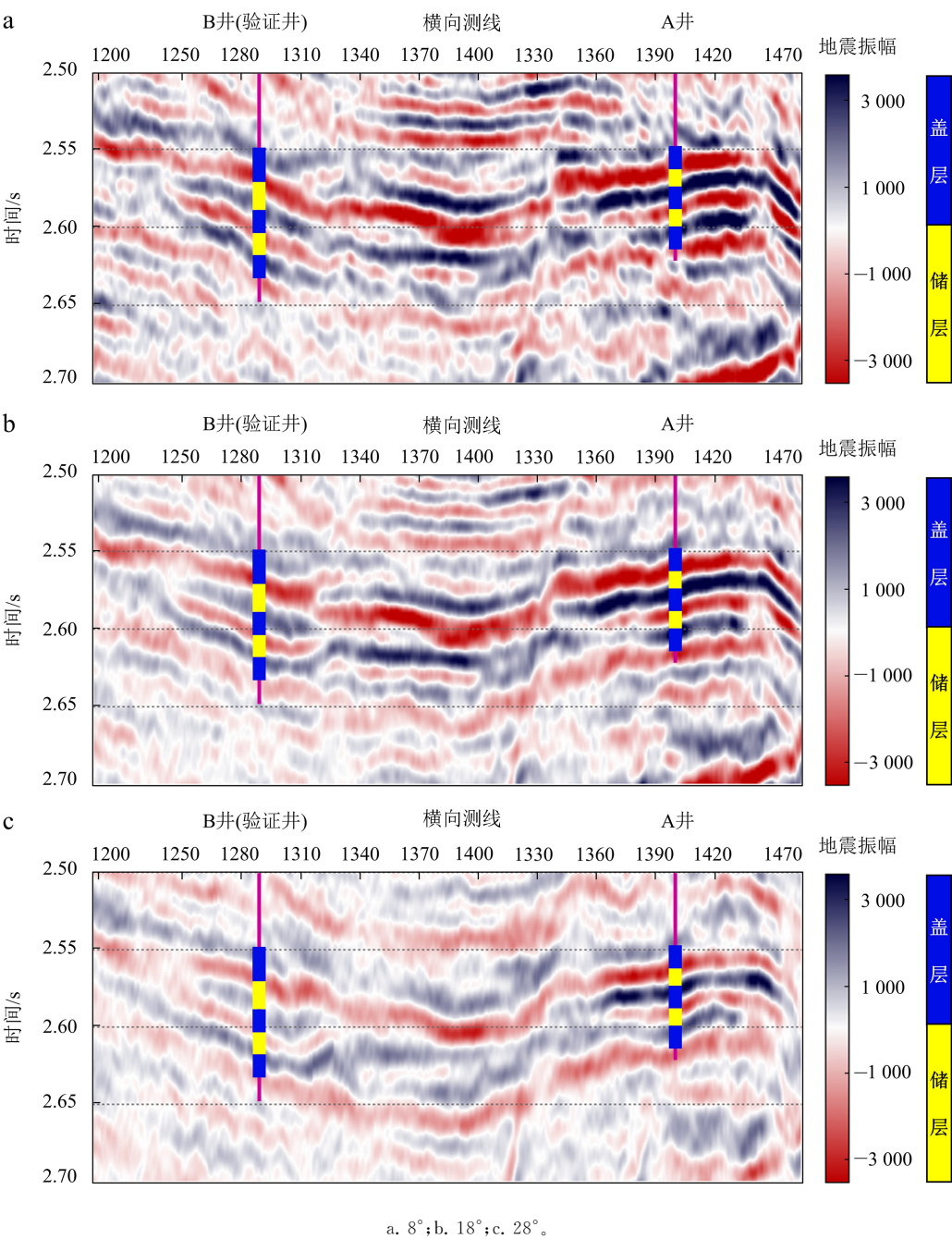


图 7 三个角度部分叠加地震数据

Fig.7 Partial stack seismic profiles from three angles

预测方法应用后新钻的井,未参与反演,也存在三个较好盖层。

图 8 分别展示了泊松阻抗和孔隙度反演结果剖面。在图 8a 中,剖面的蓝色代表泊松阻抗较高,指示盖层,剖面的黄色代表泊松阻抗较低,指示储层。A 井展示的是泊松阻抗井曲线,可以看出反演结果与井曲线匹配较好;B 井是验证井,井上蓝色代表测井解释为盖层,黄色代表测井解释为储层,可以看出泊松阻抗反演剖面与验证井匹配良好,说明基于弹性阻抗反演的泊松阻抗预测方法在盖层定性刻画盖层空间展布方面是有效的。在图 8b 中,孔隙度反演结果与 A 井孔隙度曲线对应较好,与验证井 B 井的测井岩性解释结果也有很好的吻合,说明基于弹性阻抗反演的孔隙度预测方法在定量刻画盖层空间展布方面是有效的。

图 9 展示了 A 井位置泊松阻抗、孔隙度井旁道对比及反演误差分析,可以看出反演结果与真实值

吻合良好,误差在合理范围。

平均绝对百分比误差是指将预测值与实际值之间的绝对误差转化为百分比的平均值,该参数可以较好地评估预测值的准确性和误差程度。平均绝对百分比误差越小,说明预测准确性越高。其计算公式为

$$E_{\text{MAP}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|。$$

(27)

式中: n 为值的数量; y_i 为实际值; $\hat{y}_i$ 为预测值。为了进一步定量分析预测精度,我们计算得到了井旁道泊松阻抗预测值和孔隙度预测值的平均绝对百分比误差,分别为 4.91% 和 14.88%。由此,我们可以认为,泊松阻抗的预测精度可以达到 95%,孔隙度的预测精度可以达到 85%。

图 10 显示了海域盖层泊松阻抗和孔隙度的反演结果切片,工区内另一口验证井 C 井的岩性综合

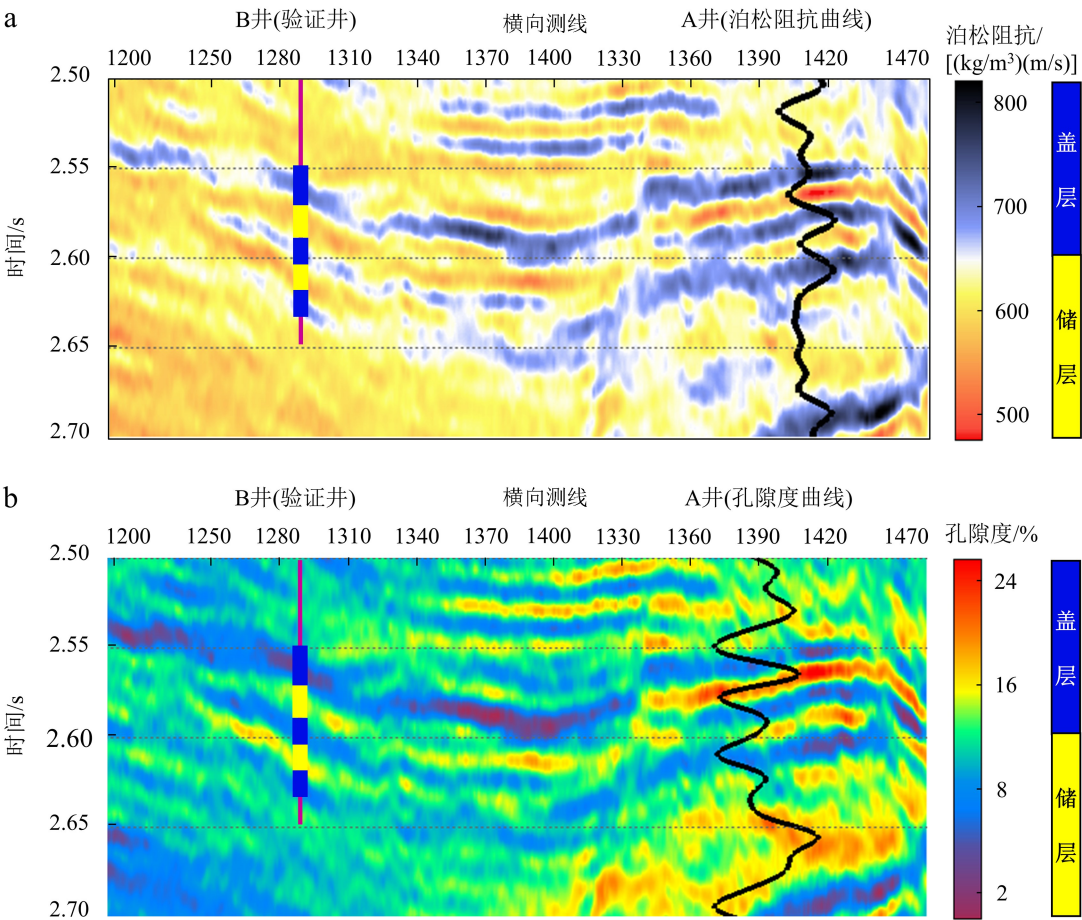
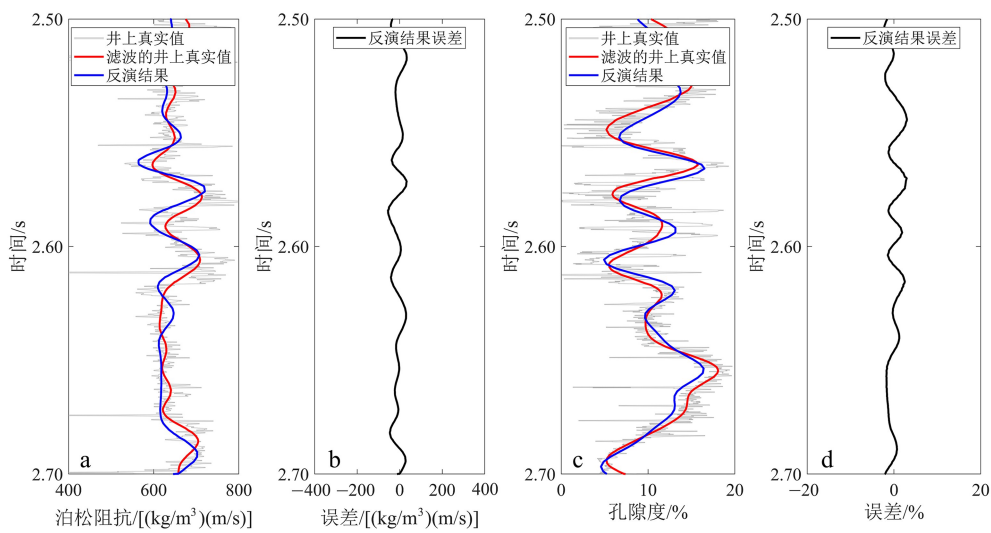


图 8 反演结果剖面

Fig.8 Inversion result profiles



a. 泊松阻抗井旁道对比;b. 泊松阻抗反演误差;c. 孔隙度井旁道对比;d. 孔隙度反演误差。

图 9 A 井位置泊松阻抗、孔隙度井旁道对比及反演误差分析

Fig.9 Inversion results comparison and error analysis of poisson impedance and porosity at location of Well A

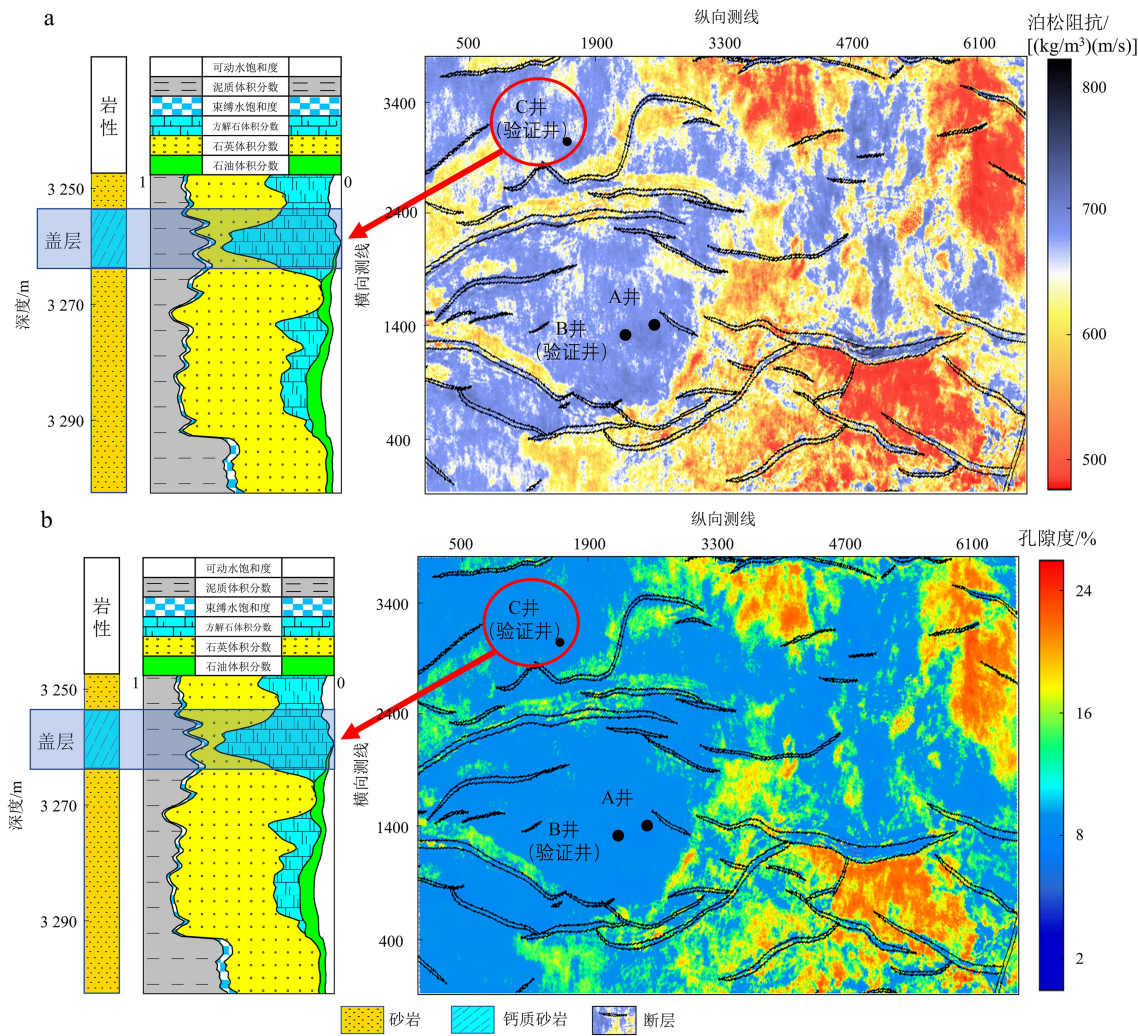


图 10 目的层反演结果切片

Fig.10 Data slice at the destination layer

解释结果在切片左侧展示。通过图 10 左侧的测井综合解释可以看出,C 井存在明显的油气盖层,盖层处钙质砂岩体积分数较高,盖层下含油体积分数较高,是良好的储层。通过反演切片可以看到,在 C 井位置处,泊松阻抗为高值、孔隙度为低值,反演结果可以有效识别验证井 C 井的油气盖层,这与岩石物理交会分析结果一致,进一步验证了海域油气盖层叠前地震反演预测方法的有效性和适用性。另外,反演结果可以较好地指示盖层所在位置及其横向展布,能够为后续海域油气的勘探开发提供帮助。

3 结论

针对海域油气盖层地震预测方法较少、预测不准确、横向展布刻画较难等问题,本文提出了一种基于岩石物理约束的海域油气盖层岩相以及物性参数叠前地震预测方法。基于本文的研究得到以下结论:

1)通过海域地层的岩石物理建模分析及敏感参数优选,发现泊松阻抗对海域油气盖层岩相更加敏感,孔隙度可以定量表征盖层的物性。

2)在盖层岩相刻画方面,利用泊松阻抗表征的弹性阻抗方程,在贝叶斯理论的框架下可以实现泊松阻抗直接反演。在盖层物性定量预测方面,通过建立针对海域油气盖层预测的岩石物理近似模型和物性参数解析表征,能够实现孔隙度预测。

3)实际资料验证了所提方法在海域油气盖层识别方面的可行性。泊松阻抗预测精度可以达到 95%,孔隙度预测精度可以达到 85%。

4)本方法的提出为海域油气盖层预测提供了新方法和可靠的地球物理依据,能够为海域油气勘探与开发提供有利指导。

参考文献(References):

- [1] 周雁,金之钧,朱东亚,等. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质,2012,34(3):234-245.
Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya, et al. Current Status and Progress in Research of Hydrocarbon Cap Rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 234-245.
- [2] 付广,刘江涛. 中国高效大中型气田形成的封盖保存条件[J]. 石油勘探与开发,2006,33(6):662-666.
Fu Guang, Liu Jiangtao. Sealing and Preservation Conditions for Large and Medium Gas Fields of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 662-666.
- [3] Dott R H, Reynolds M J. Source Book for Petroleum Geology: Semicentennial Commemorative Volume [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1969: 1-471.
- [4] 刘宗宾,程奇,吕坐彬,等. 渤海海域锦州南太古宇变质岩潜山储层特征及其发育模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(3):829-839.
Liu Zongbin, Cheng Qi, Lü Zuobin, et al. Reservoir Characteristics and Development Model of Archean Metamorphic Buried Hill in Jinzhou South Oilfield, Bohai Sea [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3):829-839.
- [5] 杨计海,杨希冰,游君君,等. 珠江口盆地珠三坳陷油气成藏规律及勘探方向[J]. 石油学报,2019,40(增刊1):11-25.
Yang Jihai, Yang Xibing, You Junjun, et al. Hydrocarbon Accumulation Law and Exploration Direction in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(Sup.1): 11-25.
- [6] 戴建文,柴愈坤,王冠民,等. 珠江口盆地恩平凹陷 A 油田新近系储层钙质砂岩夹层成因[J]. 海相油气地质,2023,28(4):391-400.
Dai Jianwen, Chai Yukun, Wang Guanmin, et al. Genesis of Calcareous Sandstone Interlayer in Neogene Reservoir of A Oilfield in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2023, 28(4): 391-400.
- [7] 谢玉洪,张功成,沈朴,等. 渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向[J]. 石油学报,2018,39(11):1199-1210.
Xie Yuhong, Zhang Gongcheng, Shen Pu, et al. Formation Conditions and Exploration Direction of Large Gas Field in Bozhong Sag of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1199-1210.
- [8] 胡杨,张伟,张景茹,等. 南海北部大陆边缘琼东南盆地有利油气聚集带及勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(4):73-86.
Hu Yang, Zhang Wei, Zhang Jingru, et al. The Favorable Petroleum Accumulation Belts and Exploration Targets in Qiongdongnan Basin on the Margin of Northern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 73-86.
- [9] 张为彪,易浩,钟辉,等. 珠江口盆地东部地区预探井失利原因分析及启示[J]. 中国石油勘探,2018,23(3):

- 18-27.
- Zhang Weibiao, Yi Hao, Zhong Hui, et al. Analysis on the Causes of Failed Wildcat Wells in the Eastern Pearl River Mouth Basin and Its Enlightenment[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 18-27.
- [10] Downey M W. Evaluating Seals for Hydrocarbon Accumulation[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11): 1752-1763.
- [11] Grunau H R. Worldwide Review of Seals for Major Accumulations of Natural Gas: ABSTRACT [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(5): 933.
- [12] 张树林,田世澄. 盖层的研究方法及其在油气勘探中的意义[J]. 地质科技情报,1993,12(1):73-78.
- Zhang Shulin, Tian Shicheng. Methods for Reserch of Caprocks and Their Significance in Hydrocarbon Exploration[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(1): 73-78.
- [13] 付广,康德江,段海凤. 泥质岩盖层对水溶相天然气封闭能力的综合评价方法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(1):60-65.
- Fu Guang, Kang Dejiang, Duan Haifeng. A Comprehensive Evaluation Method on Seal Ability of Mudstone Caprock to Gas in Water-Dissolving Phase and Its Application[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(1): 60-65.
- [14] 付广,胡明,于丹. 火山岩盖层类型及封气能力:以松辽盆地徐家围子断陷为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2):237-244.
- Fu Guang, Hu Ming, Yu Dan. Volcanic Cap Rock Type and Evaluation of Sealing Gas Ability: An Example of Xujiaweizi Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 237-244.
- [15] Wu S Y, Sun S Q, Pollitt D A. Quantitative Evaluation of Hydrocarbon Containment Using Seal Strength Index (SSI) and Benchmarking Against Global Analogues[C]// Aria A, Aiman M B. Third International Meeting for Applied Geoscience & Energy. Houston: Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, 2023: 526-530.
- [16] Davis T L, Benson R D, Stroker T. Seal Identification from Time-Lapse Multicomponent Seismic Data, Rulison Field, Piceance Basin, Colorado[C]// John C. SEG Technical Program Expanded Abstracts. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2009: 1875-1879.
- [17] Nourollah H, Keetley J, O'Brien G. Gas Chimney Identification Through Seismic Attribute Analysis in the Gippsland Basin, Australia [J]. The Leading Edge, 2010, 29(8): 896-901.
- [18] Nourollah H, Urosevic M, Keetley J. Seal Potential of Shale Sequences Through Seismic Anisotropy: Case Study from Exmouth Sub-Basin, Australia[J]. Interpretation, 2015, 3(4): T257-T267.
- [19] 侯贤沐,王付勇,宰芸,等. 基于机器学习和测井数据的碳酸盐岩孔隙度与渗透率预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(2):644-653.
- Hou Xianmu, Wang Fuyong, Zai Yun, et al. Prediction of Carbonate Porosity and Permeability Based on Machine Learning and Logging Data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 644-653.
- [20] 栾颖,冯珏,刘财,等. 波阻抗反演技术的研究现状及发展[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2008,38(增刊1):94-98.
- Luan Ying, Feng Xuan, Liu Cai, et al. The Research Present and Future of Wave Impedance Inversion Technique[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(Sup. 1): 94-98.
- [21] Ji L X, Zong Z Y. Lithology Discrimination Based on Direct Inversion of Poisson Impedance for Deep Tight-Sandstone Reservoirs [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2023, 20(1): 38-48.
- [22] Connolly P. Elastic Impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438-452.
- [23] Whitcombe D N, Connolly P A, Reagan R L, et al. Extended Elastic Impedance for Fluid and Lithology Prediction[J]. Geophysics, 2002, 67(1): 63-67.
- [24] 王保丽,印兴耀,张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(4): 435-439.
- Wang Baoli, Yin Xingyao, Zhang Fanchang. Gray Approximation: Based Elastic Wave Impedance Equation and Inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4): 435-439.
- [25] 宗兆云,印兴耀,吴国忱. 拉梅参数直接反演技术在碳酸盐岩缝洞型储层流体检测中的应用[J]. 石油物探, 2011,50(3):241-246.
- Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Wu Guochen. Application of Lamé Parameter Direct Inversion in Fluid Identification for Carbonate Reservoir [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(3): 241-246.

- [26] 李超,印兴耀,张广智,等. 基于入射角的 AVO 近似弹性波阻抗方程及反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1663-1671.
Li Chao, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi, et al. Elastic Impedance Equation Based on the Incident-Angle AVO Approximation and Inversion[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1663-1671.
- [27] 张广智,杜炳毅,陈怀震,等. 纵横波弹性阻抗联合反演方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1695-1704.
Zhang Guangzhi, Du Bingyi, Chen Huaizhen, et al. Joint Inversion of PP and PS Waves Elastic Impedance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1695-1704.
- [28] 马妮,印兴耀,孙成禹,等. 基于方位地震数据的地应力反演方法[J]. 地球物理学报,2018,61(2):697-706.
Ma Ni, Yin Xingyao, Sun Chengyu, et al. Inversion for Crustal Stress Based on Azimuthal Seismic Data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(2): 697-706.
- [29] 李博南,刘财,郭智奇. 基于等效介质模型和频变 AVO 反演的裂缝储层参数估算方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2017,47(1):234-244.
Li Bonan, Liu Cai, Guo Zhiqi. Estimation of Fractured Reservoir Parameters Based on Equivalent Media Model and Frequency-Dependent AVO Inversion[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1): 234-244.
- [30] 邓伟,印兴耀,宗兆云,等. 基于逆算子估计的高阶 AVO 非线性反演[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(5):955-964.
Deng Wei, Yin Xingyao, Zong Zhaoyun, et al. High-Order Nonlinear AVO Inversion Based on Estimated Inverse Operator[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(5): 955-964.
- [31] 印兴耀,李坤,宗兆云,等. 时频联合域贝叶斯地震反演方法[J]. 石油物探,2017,56(2):250-260.
Yin Xingyao, Li Kun, Zong Zhaoyun, et al. Seismic Inversion in Joint Time-Frequency Domain Based on Bayesian Scheme[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(2): 250-260.
- [32] 印兴耀,贺东阳,宗兆云,等. 结合序贯指示模拟的贝叶斯高斯混合线性反演[J]. 地球物理学报,2019,62(12):4805-4816.
Yin Xingyao, He Dongyang, Zong Zhaoyun, et al. Bayesian Gaussian Mixture Linear Inversion Combined with Sequential Indicator Simulation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(12): 4805-4816.
- [33] Zong Z Y, Yin X Y. Direct Inversion of Young's and Poisson Impedances for Fluid Discrimination[J]. Geofluids, 2016, 16(5): 1006-1016.
- [34] Ji L X, Zong Z Y. Lithology Discrimination Based on Direct Inversion of Poisson Impedance for Tight-Stone Reservoirs[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2023, 20: 38-48.
- [35] Bayes T. XLIII: A Letter from the Late Reverend Mr Thomas Bayes, F R S to John Canton, M A and F R S[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1763, 53: 269-271.
- [36] Zong Z Y, Wang Y R, Li K, et al. Broadband Seismic Inversion for Low-Frequency Component of the Model Parameter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(9): 5177-5184.
- [37] Daubechies I, DeVore R, Fornasier M, et al. Iteratively Reweighted Least Squares Minimization for Sparse Recovery[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics: A Journal Issued by the Courant Institute of Mathematical Sciences, 2010, 63(1): 1-38.
- [38] Hill R. The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate[J]. Proceedings of the Physical Society: Section A, 1952, 65(5): 349.
- [39] Kuster G T, Toksöz M N. Velocity and Attenuation of Seismic Waves in Two-Phase Media: Part I: Theoretical Formulations[J]. Geophysics, 1974, 39(5): 587-606.
- [40] Brown R J S, Korringa J. On the Dependence of the Elastic Properties of a Porous Rock on the Compressibility of the Pore Fluid[J]. Geophysics, 1975, 40(4): 608-616.
- [41] 李红兵,张佳佳,潘豪杰,等. 基于弹性阻抗的孔隙结构与物性参数非线性同步反演[J]. 中国科学: 地球科学,2021,51(7):1166-1180.
Li Hongbing, Zhang Jiajia, Pan Haojie, et al. Nonlinear Simultaneous Inversion of Pore Structure and Physical Parameters Based on Elastic Impedance[J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 51(7): 1166-1180.