

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.03.016

叠前同时反演技术在南黄海崂山隆起储层预测中的应用

吴淑玉^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 刘俊^{1,2,3}, 张银国^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 袁勇^{1,2}, 陈春峰⁴, 许明^{1,2},
张玉玺^{1,2,3}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 自然资源部天然气水合物实验室, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071
3. 中国地质大学(武汉), 资源学院, 武汉 430074
4. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030

摘要:南黄海中-古生代地层发育多套海相碳酸盐岩, 由于其储层成因的非均质性和复杂性造成地震响应差异较大, 因此, 碳酸盐岩储层预测为本区油气勘探的重点和难点。根据岩石物理分析, 物性指示因子对孔隙度比较敏感, 能够较好地判断碳酸盐岩物性的优劣。在此基础上通过对CRP地震道集进行优化、分角度提取地震子波和建立高精度的低频模型, 采用叠前同时反演方法, 得到纵波阻抗(Z_p)、横波阻抗(Z_s)和密度体(ρ), 由坐标旋转得到的物性指示因子数据体, 能够有效地预测碳酸盐岩有利储层。根据叠前同时反演结果, 南黄海中-古生界上震旦统灯影组(Z_2d)白云岩、中-上寒武统—奥陶系($C_{2-3}-O$)灰岩和石炭系-下二叠统($C-P_{1q}$)碳酸盐岩, 物性较好, 尤其是位于古高地的局部发育风化壳、淋滤带、白云岩, 其孔、洞、缝比较发育, 碳酸盐岩储层的孔隙条件较好, 易形成有利的储层。因此, 采用叠前同时反演方法较为准确地预测了南黄海海相碳酸盐岩有利储层的分布范围, 为下一步的南黄海参数井的钻探提供了可靠的地球物理技术支持。

关键词:碳酸盐岩; 储层; 叠前同时反演; 物性; 南黄海

中图分类号: P738 **文献标识码:** A

Application of pre-stack simultaneous inversion in the reservoir prediction in South Yellow Sea basin

WU Shuyu^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, LIU Jun^{1,2,3}, ZHANG Yinguo^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, YUAN Yong^{1,2}, CHEN Chunfeng⁴,
XU Ming^{1,2}, ZHANG Yuxi^{1,2,3}

1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China
3. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Shanghai Branch of CNOOC Ltd, Shanghai 200030, China

Abstract: Thick marine Mesozoic- Paleozoic carbonate deposits occur in the South Yellow Sea basin. Owing to the high complexity and heterogeneity of the reservoirs which may cause complicated seismic responses, the prediction of carbonate reservoir remains difficult to oil and gas exploration in the basin. Petrophysical data shows that the property indicator factor is sensitive to porosity and thus could be used to judge the quality of carbonate reservoir. Therefore, we optimized CRP the seismic gather, extract the wavelet from different angle and then establish a low frequency model of high precision, and upon the basis we obtained the P-wave impedance(Z_p), S-wave impedance (Z_s), density data(ρ), and finally the property data by rotation of coordinates, which can be adopted to predict the high quality carbonate reservoir. It is revealed that there are carbonate reservoirs in the Upper Sinian dolomite(Z_{2d}), Middle Cambrian to Ordovician limestone($C_{2-3}-O$) and the Carboniferous to Permian limestone($C-P_{1q}$). And the quality of reservoir, in particular the weathering crust, leached zone and local dolomite with cavities and fractures in some areas on the paleo-upland, could be improved and become favorable for hydrocarbon accumulation. Facts prove that pre-stack simultaneous inversion can provide reliable geophysical parameters for

资助项目: 青岛市市南区科技发展资金项目基金“南黄海中-古生界海相碳酸盐岩储层叠前反演研究”(2016-3-009-ZH); 国家海洋局海底重点实验室基金“台西南盆地沉积基底特征和莫霍面构造形态综合地球物理研究”(KLSG1603); 中国地质调查项目“南黄海海域油气资源普查”“南黄海油气资源调查”(GZH200800503、DD20160152); 国家自然科学基金“下扬子地区下寒武统深水陆棚相富含有机质泥页岩差异性成岩演化过程及其对孔隙发育的控制作用”(41702162); 国家重点研发计划“天然气水合物储层高精度刻画技术”(2017YFC0307406-03)

作者简介: 吴淑玉(1985—), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事地震资料解释和反演工作, E-mail: hnwushuyu@163.com

通讯作者: 陈建文(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海域油气资源调查评价与研究工作, E-mail: jwchen2012@126.com

收稿日期: 2018-01-18; **改回日期:** 2018-02-27. 蔡秋蓉编辑

reservoir assessment and prediction.

Key words: carbonate; reservoir; pre-stack simultaneous inversion; property; the South Yellow sea

下扬子板块是我国南方海相碳酸盐岩分布的重要地区,从晚震旦世开始到三叠纪结束长达 7 亿年的海相沉积演化过程中形成了广泛而巨厚的海相沉积^[1]。南黄海是下扬子板块向东延伸的主体,北部以苏鲁造山带为界与中朝块体相邻,南部以江绍断裂带为界与华南块体相望,西接下扬子苏北盆地^[2]。南黄海盆地经历过加里东、印支、燕山和喜山等一系列的构造运动,现今盆地的构造格局北以千里岩隆起为界,南以勿南沙隆起为界,盆地从北到南可以划分为烟台拗陷、崂山隆起、青岛拗陷 3 个二级构造单元^[3-5](图 1)。

对比南黄海盆地和下扬子陆域的钻井及地震资料,中-古生界(以 T₂ 界面为界线)从老到新主要发育以下几套主要的碳酸盐岩:上震旦统灯影组(Z₂d)潮坪-局限台地相的白云岩,中-上寒武统(C₂₋₃)盆地

相-台缘斜坡相泥质岩,台地相白云岩及白云质灰岩,奥陶系(O)浅海陆棚相碳酸盐岩,石炭系-下二叠统栖霞组(C-P₁q)潮坪-台地相碳酸盐岩和三叠统青龙组(T₁q)的碳酸盐岩^[6](图 2)。截至目前,下扬子陆域海相地层发现 3 个油气田:句容油田、朱家墩油气田和黄桥气田,而南黄海油气调查工作已有 50 余年的历史^[7],至今尚未获得油气的重大突破^[4, 8, 9]。实际勘探过程中发现碳酸盐岩储层非均质性强、储集性能差以及后期改造较为严重的不利因素,造成地震响应差异较大,因此,目前对碳酸盐岩储层预测是南黄海油气勘探的重点和难点。

南黄海中-古生界海相碳酸盐岩储层主要受沉积、成岩和构造作用影响,前人对南黄海碳酸盐岩储层预测主要利用地震属性变化^[3, 10]和速度分析^[2, 11-13]方法,在一定程度上能够将碳酸盐岩储层

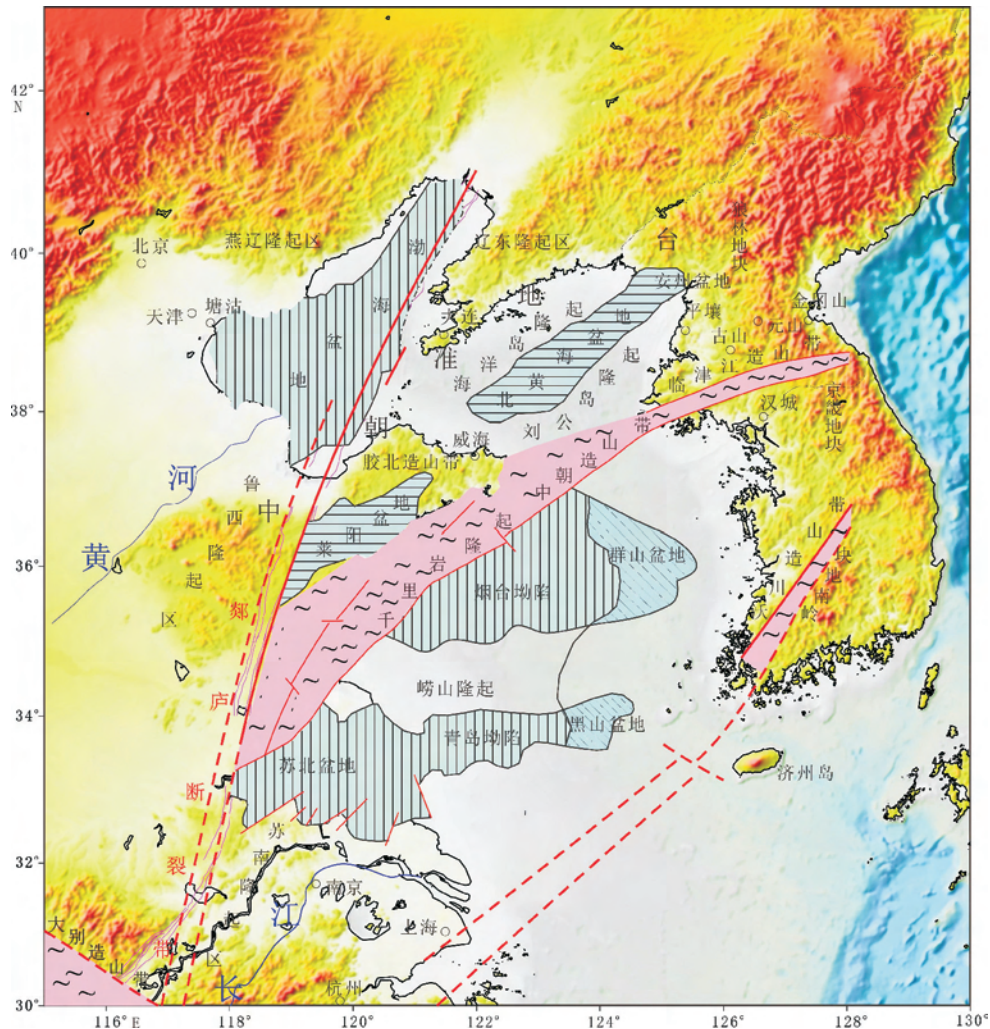


图 1 南黄海盆地及相邻的大地构造格局

Fig.1 Tectonic map of South Yellow Sea basin and its adjacent areas

进行有效预测,但是利用叠后地震技术是基于零偏移距道集叠加的地震资料分析,单纯应用叠后地震进行属性分析和叠后波阻抗反演会增加储层预测的多解性以及难以对有效储层进行识别^[14],而叠前地震资料反演是基于能够反映振幅随偏移距变化的多个角度叠加的叠前地震数据体,需充分利用测井曲线进行叠前同时反演,得到纵波阻抗、横波阻抗和密度^[15, 16],并通过相关公式得到一系列岩性指示因子和物性指示因子等弹性参数体,才能有效地预测有利储层。本文通过对南黄海碳酸盐岩储层进行岩

石物理分析基础上,提取有利储层的敏感弹性参数,采用叠前同时反演方法对研究区碳酸盐岩的有利储层进行有效的预测。

1 方法原理

叠前同时反演是将叠前 CRP 地震道集按照远、中、近偏移距进行部分叠加,同时反演出纵波阻抗(Z_P)、横波阻抗(Z_S)和密度(ρ),根据 Zoepprize 方程^[17]演化而来:

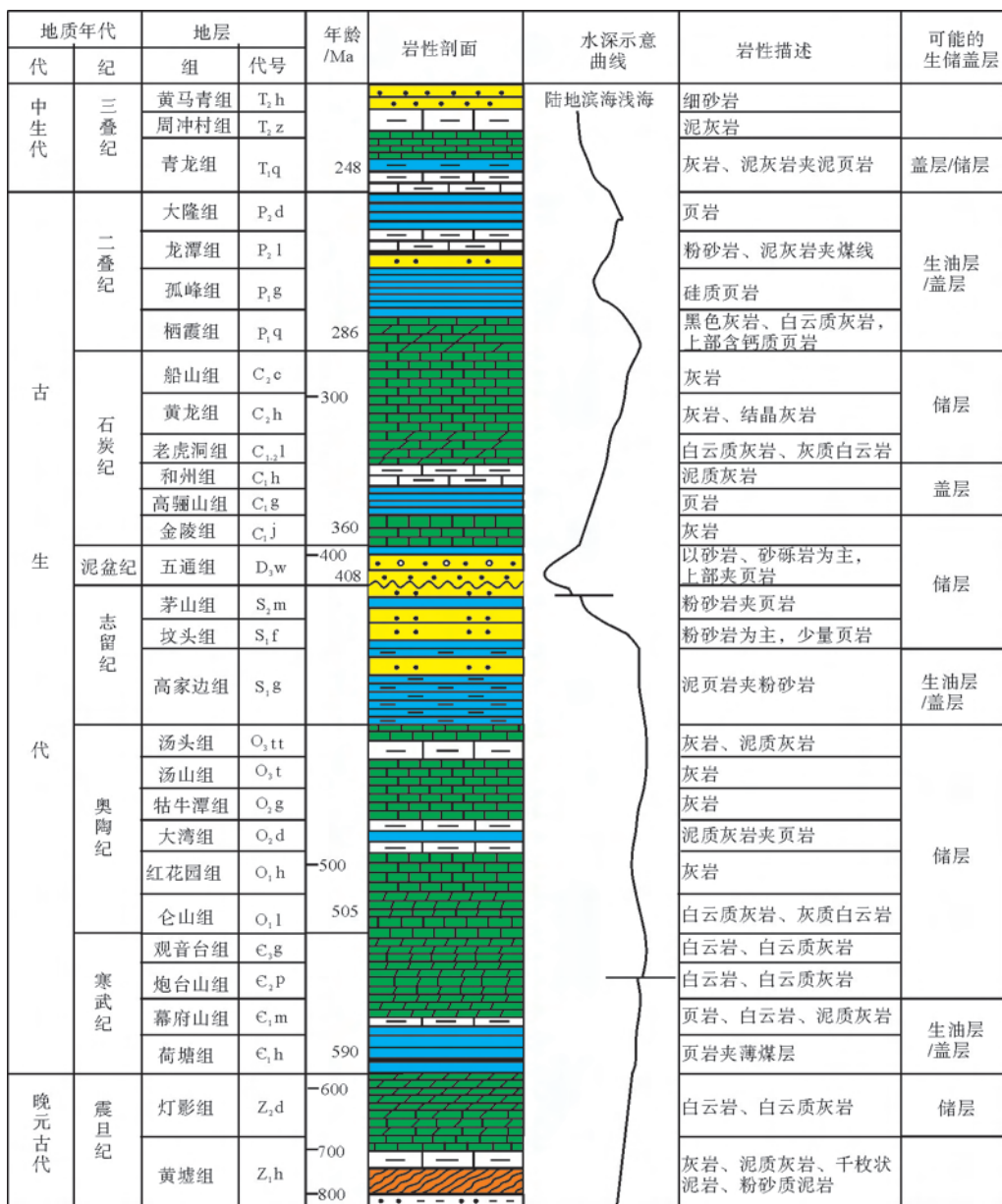


图2 南黄海地层综合柱状图(据文献[6])

Fig.2 Integrated stratigraphic column of the South Yellow Sea

$$\begin{bmatrix} \sin\alpha_1 & \cos\beta_1 & -\sin\alpha_1 & \cos\beta_2 \\ \cos\alpha_1 & -\sin\beta_1 & \cos\alpha_2 & \sin\beta_2 \\ \cos 2\beta_1 & \frac{v_{s1}}{v_{p1}} \sin 2\beta_1 & \frac{\rho_2 v_{p2}}{\rho_1 v_{p1}} \cos 2\beta_2 & \frac{\rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{p1}} \sin 2\beta_2 \\ \frac{v_{s1}^2}{v_{p1}} \sin 2\alpha_1 & v_{s1} \cos 2\beta_1 & \frac{\rho_2 2v_{s2}^2}{\rho_1 v_{p2}} \sin 2\alpha_2 & \frac{\rho v_{s2}}{\rho_1} \cos 2\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_P \\ R_S \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha_1 \\ \cos\alpha_1 \\ -\cos 2\beta_1 \\ \frac{v_{s1}^2}{v_{p1}} \sin 2\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 v_{p1}, v_{s1}, ρ_1 为上部地层的纵波速度、横波速度和密度; v_{p2}, v_{s1}, ρ_2 为下部地层的纵波速度、横波速度和密度; R_P 为纵波反射系数, R_S 为横波反射系数, T_P 为纵波透射系数, T_S 为横波透射系数, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ 分别为纵波入射角、横波反射角、纵波透射角和横波透射角。

1980 年 Aki 和 Richard 对 Zoeppritz 进行简化, 得到 Aki-Richard 近似表达式^[18], 得到了当弹性参数的相对变化 $\frac{\Delta v_p}{v_p}, \frac{\Delta v_s}{v_s}, \frac{\Delta \rho}{\rho}$ 较小时, 利用纵波速度、横波速度和密度的相对变化表示的反射系数公式^[19], 即:

$$R_p(\theta) = \frac{1}{2} (1 - 4 \frac{v_s^2}{v_p^2} \sin^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\sec^2 \theta \Delta v_p}{2 v_p} - 4 \frac{v_s^2}{v_p^2} \theta \sin^2 \theta \frac{\Delta v_s}{v_s} \quad (2)$$

式中 v_p, v_s, ρ 分别为界面两侧的纵波速度、横波速度和密度平均值, $v_p = \frac{v_{p1} + v_{p2}}{2}, v_s = \frac{v_{s1} + v_{s2}}{2}, \rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$; $\Delta v_p, \Delta v_s, \Delta \rho$ 分别为界面两侧纵波速度、横波速度和密度的差值, $\Delta v_p = v_{p2} - v_{p1}, \Delta v_{s2} - v_{s1}, \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ 。 $\theta = \frac{\theta_i + \theta_t}{2}$ 为入射纵波的入射角和透射纵波的透射角平均值, θ_i 为入射纵波的入射角, θ_t 为透射纵波的透射角, Aki-Richards 方程可以写成 Fatti 方程^[20]的形式:

$$R_{PP}(\theta) = c_1 R_P + c_2 R_P + c_3 R_D \quad (3)$$

其中 $c_1 = 1 + \tan^2 \theta$, R_p 为法向入射时的纵波反射系数, $R_P = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right], c_2 = -8\gamma^2 \sin \theta, R_S$ 为横波反射系数, $R_S = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta v_s}{v_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right], c_3 = -\frac{1}{2} \tan^2 \theta + 2\gamma^2 \sin \theta, R_D$ 为密度反射系数, $R_D = \frac{\Delta \rho}{\rho}$, 其中 $\gamma = \frac{v_s}{v_p}$ 。

由于方程(3)的各个系数在数量级上是不同的, 使得在小角度的情况下求解得到 R_S 和 R_D 不稳定, 加上 Z_P, Z_S 和 ρ 两两之间存在着相关性, 因此, 通

过以下方式消除上述问题, 假设背景为含水岩层的情况下, 存在趋势关系^[14, 21-23], 由 Castagna 方程^[24]常数, 得到:

$$\ln(Z_S) = \ln(Z_P) = \ln(\gamma) \quad (4)$$

由 Gardner 方程^[25], $\rho = av_p^b$, 得到:

$$\ln(\rho) = \frac{b}{1+b} \ln(Z_P) + \frac{\ln(a)}{1+b} \quad (5)$$

由上述关系, 可以得到更一般的背景趋势关系:

$$\begin{cases} \ln(Z_S) = k \ln(Z_P) + k_c + \Delta L_S \\ \ln(\rho) = m \ln(Z_P) + m_c + \Delta L_D \end{cases} \quad (6)$$

k 和 m 为含水背景趋势的斜率, k_c 和 m_c 为含水背景趋势的截距, ΔL_S 和 ΔL_D 为烃类响应, 当为含水背景时, 其值为 0。这样, Fatti 方程可以写成如下形式:

$$\begin{cases} T(\theta) = \tilde{c}_1 W(\theta) DL_P + \tilde{c}_2 W(\theta) D \Delta L_D \\ \tilde{c}_1 = \frac{1}{2} c_1 + \frac{1}{2} k c_2 + m c_3 \\ \tilde{c}_2 = \frac{1}{2} c_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $W(\theta)$ 为入射角 θ 处的子波; D 为导数因子, $L_P = \ln(Z_P), T(\theta)$ 为地震记录。

改进后的方程(7)对方程(3)具有以下优点:

(1)各变量之间是相互不关联的;(2)建立了含水背景下各个变量之间的岩石物理特征关系。

本文叠前同时反演的流程如图 3, 具体步骤是在建立井点储层地质模型和岩石物理模型的基础上, 利用 Xu-white 模型通过纵波速度求取横波速度, 进行岩石物理弹性参数计算, 分析研究区岩性和物性敏感弹性参数, 利用叠前地震 CRP 道集进行精细的 AVO 处理和分析, 寻找不同孔隙储层的响应特征^[26, 27], 对 CRP 地震道集进行分角度叠加得到远、中、近的叠加数据体, 合成地震记录提取不同角度道集的子波, 构建纵波阻抗(Z_P)、横波阻抗(Z_S)和密度(ρ)低频模型, 对远、中、近的叠加数据体以及构建的低频模型代入公式(7)进行叠前同时反演, 反演得到纵波阻抗、横波阻抗和密度体, 并利用岩石物理关系式得到物性因子和流体因子, 从而对碳酸盐岩有利储层进行解释^[27]。

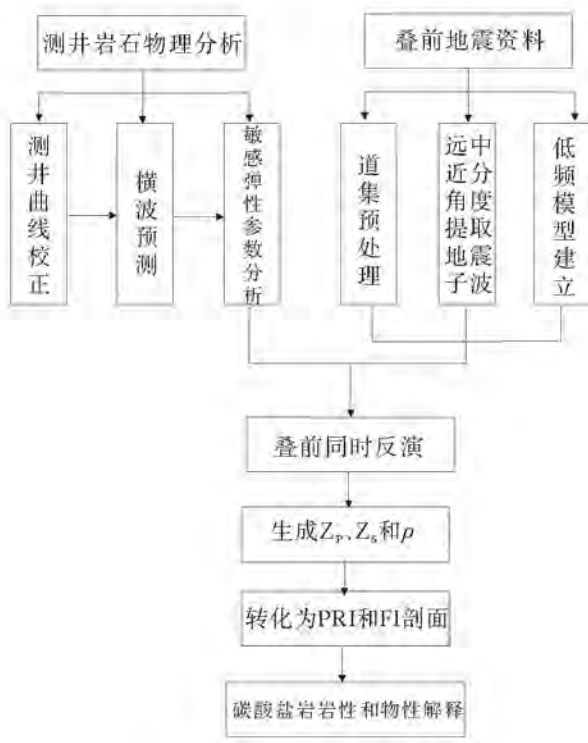


图3 叠前同时反演流程图

Fig.3 Processing chart of pre-stack simultaneous inversion

2 碳酸盐岩储层特征

南黄海碳酸盐岩按沉积环境划分为颗粒灰岩、泥晶灰岩和白云岩类。颗粒灰岩是南黄海地区发育规模较大的浅水滩相沉积,在震旦系、寒武系、奥陶系和下二叠统都有发育,根据沉积相分析石炭系和下三叠统也发育小型台地点滩和潮间滩,按照不同填隙物将颗粒灰岩细分为亮晶颗粒灰岩和泥晶颗粒灰岩,其中亮晶颗粒灰岩发育种类较多,有亮晶内碎屑灰岩、细晶-微晶生物碎屑灰岩、亮晶球粒灰岩,生物碎屑灰岩。微晶灰岩的晶粒大小约为0.004~0.10mm,为细晶-微晶状,见少量晶粒>0.10mm或<0.004mm的方解石不均匀分布,晶粒间结合紧密,见重结晶现象,部分方解石呈似砂屑状,微裂缝发育,缝宽约0.01mm,泥晶方解石充填(图4a)。灰质白云岩具细晶-粉晶结构,块状构造,矿物成分主要为白云石,粒状,粒径0.06~0.2mm,见雾心亮边结构,雾心可能是白云石交代方解石的残余物,裂缝发育被方解石、铁泥质充填(图4b)。总的来说,下扬子地区灰岩孔隙不太发育,主要以构造缝和晶间孔为主;白云岩在震旦系、寒武系、奥陶系、上石炭统船山组和下三叠统青龙组都有发现,且溶孔发育,

孔隙条件较好^[4]。不仅在灰岩,还有在白云岩层段,都能看到溶蚀孔,特别在构造活跃层段,能见到较多的角砾,沿着角砾发生溶蚀作用,角砾间溶蚀扩大孔较为发育,其次为少量的晶间溶蚀扩大孔(图4c),另外还发育构造缝,缝中半充填,且有微弱的溶蚀扩大,晶间孔以白云石或方解石晶间孔为主(图4d)。

据南黄海井点物性条件统计,下三叠统上青龙组灰岩孔隙度为2.7%~5.6%,平均为4.01%,渗透率<0.01mD;下青龙组灰岩孔隙度为0.8%~1.6%,平均为1.12%,渗透率平均0.04mD;下二叠统栖霞组灰岩孔隙度在0.46%~2.05%之间,平均为1.24%,渗透率<0.01mD;上石炭统船山组藻灰岩孔隙度为0.86%~3.55%,平均为1.81%,渗透率<0.01mD,总体上碳酸盐岩储层为低孔低渗储层。但局部存在高孔高渗层段,如石炭系顶部和下二叠统顶部的风化壳和淋滤带为白云岩发育段,CZ12-1-1井船山组顶部风化剥蚀面孔隙度高达14%,CZ35-2-1井栖霞组发育孔隙为6.6%~10.4%,WX13-3-1井栖霞组顶部孔隙度为3.33%~20.19%,WX5-ST1井下青龙组灰岩中发育25m厚高孔渗白云岩,孔隙度为6%~8%,CZ12-1-1井和州组白云质灰岩孔隙度在4.1%~7.8%。另外在孔、洞、缝发育的碳酸盐岩地层,其储层的孔隙条件较好,易构成较有利的储层。

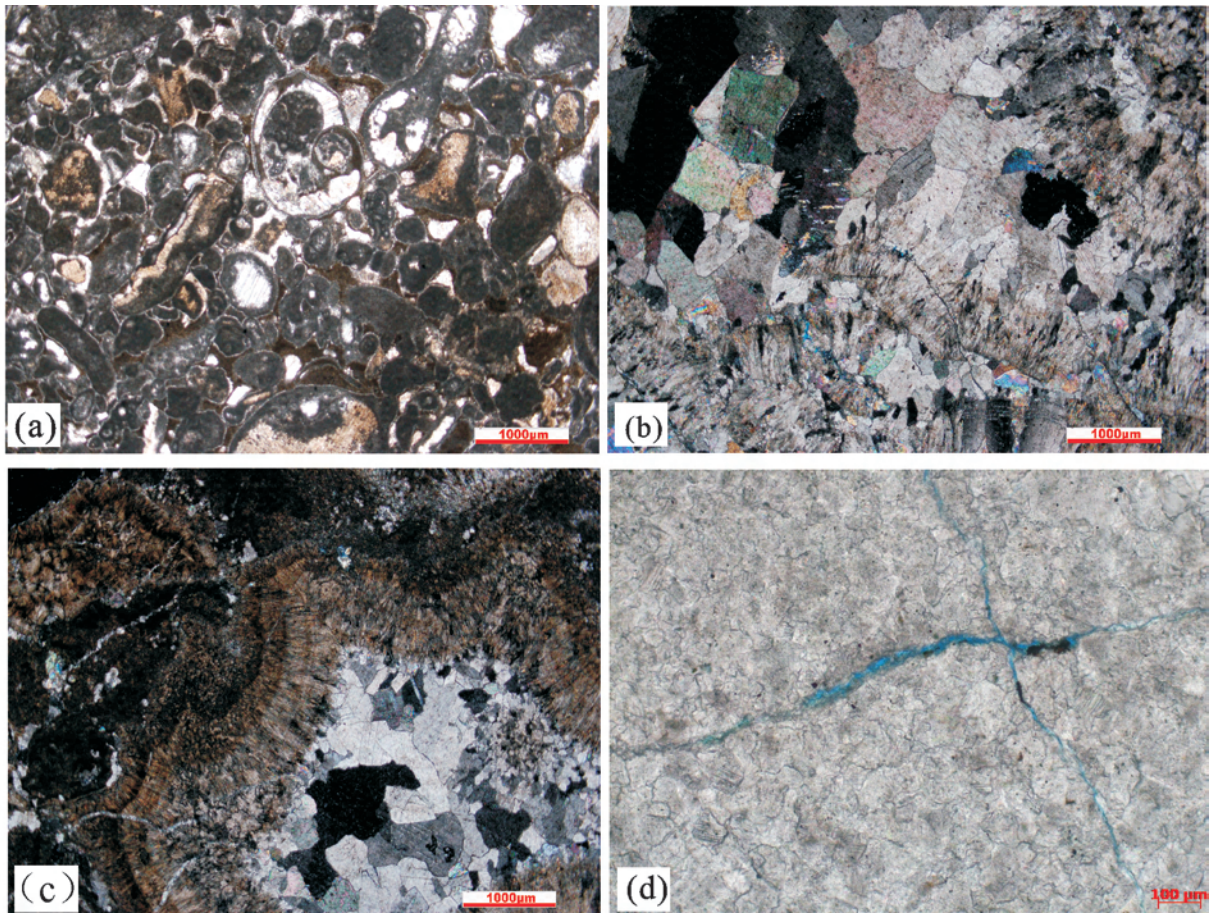
一般情况下,白云岩比灰岩的声波阻抗大,当白云岩中有孔隙发育时,其阻抗会降低,从而与灰岩的阻抗相近;另外碳酸盐风化壳一般具有较高的速度和密度,由于孔、洞、缝的存在造成速度和密度的下降。基于以上碳酸盐岩的非均质性,使得储层与非储层的纵波阻抗频率直方图相互叠置,从而导致利用常规纵波阻抗反演方法难以区分储层和非储层。

3 岩石物理分析技术

通常情况下,不同的岩石具有不同的物理特性,岩石物理特性与地震特征有直接的关系^[23, 28],岩石物理分析是叠前岩性与物性反演的基础,也是连接地震-测井-储层物性参数之间的桥梁和纽带,为了更好地开展碳酸盐岩储层预测工作,首先要对不同储层类型进行岩石物理分析工作,优选有利储层敏感的弹性参数,为有利储层预测工作指明方向^[29]。

3.1 横波预测

横波资料是岩石物性研究的基础,叠前地震资料反演重要参数,而南黄海测井曲线缺少横波,因



(a)石炭系船山组,含生屑细晶-微晶灰岩,细晶-微晶状,生物碎屑主要为介屑、棘屑等,矿物成分为方解石,不均匀分布,晶粒大小约为 0.004~0.10mm,CZ12-1-1 井,2074.2m;(b)寒武系冷泉王组,灰质白云岩,孔隙不发育,白云石矿物粒径 0.06~0.2mm,在脉体中偶见方解石溶蚀孔,安徽巢湖汤山;(c)震旦系灯影组白云岩中的溶蚀孔,粒屑结构,块状构造,粒径 0.3~3.5mm,边缘不清晰,围绕团块具栉壳结构,原生孔隙中中晶、细晶方解石充填,巢湖青苔山;(d)下奥陶统伦山组,灰岩中的构造缝,缝宽约 0.01~0.02mm,部分被方解石充填

图 4 下扬子中-古生界海相碳酸盐岩铸体薄片显微照片

Fig.4 Micrographs of Mesozoic-Paleozoic carbonates in the Lower Yangtze areas

此,需要对横波进行预测,一般是通过岩石物理建模、流体替代以及经验公式模型等多种技术手段预测横波,获得各种弹性模量和弹性参数,为正演模拟、AVO 属性分析,叠前同时反演提供基础参数和信息。以 Xu-White 岩石物理模型为基础,根据骨架和泥质不同的纵横直径比以及其他有关参数来估算岩石的体积模量和剪切模量,并按照孔隙中流体的性质来估计流体对岩石模量的影响,再此由密度测井的密度测井曲线和 Xu-White 模型得出的体积模量和剪切模量,便可导出岩石的纵、横波速度^[30]。

图 5 中第 4 道蓝色线为实测的纵波曲线,红色线为预测的纵波曲线,可以看出实测和预测的纵波曲线吻合较好,两者的相对误差整体较小,为 0~0.1%,在浅部地层两者的相对误差最小,仅为 0~0.05%,而随着深度的加大,误差也增大,达到

0~0.1%,但误差都在可容范围之内^[30]。图 5 第 6 道为最终求得横波速度,其范围值为 2000~4000 m/s,符合陆上苏北三叠系地层碳酸盐岩地层的纵、横波速度分布,说明通过 Xu-White 岩石物理模型进行横波预测具有一定的岩石物理规律,预测横波速度相对可靠,能够满足叠前反演需求,为后续的 AVO 分析和叠前同时反演奠定了基础。

3.2 敏感弹性参数分析

通过对横波速度进行预测,根据岩石物理方程,得到泊松比、拉梅系数、体积模量、剪切模量、杨氏模量等系数,另外通过对纵横波阻抗合适的坐标旋转以及转换,构建物性指示因子,关系式如下:

$$Y = Z_P \times \cos(\theta) + Z_S \times \sin(\theta) \quad (8)$$

研究发现,新的指示因子随着 θ 角度的改变而

变化,在不同的角度上可以与传统的储层或弹性参数具有较高的相关性,由以上方法我们可以得到物性指示因子(RPI):与孔隙度参数相关最大的角度所计算出的阻抗组合。此种方法具有至少具有3个方面的先进性:首先是增大了划分岩性和物性性质的区分度和识别率;其次是把多参数交会识别有利区降维至单参数识别;最后是一定程度上克服了背

景趋势给识别有利储层带来的干扰。

根据 CZ35-2-1 井碳酸盐岩和碎屑岩的测井曲线(图 6),可以看出碳酸盐岩相对碎屑岩具有高密度、高泊松比、高拉梅系数、高剪切模量和杨氏模量、高纵横波速度、高纵横波速度比和低自然伽马,在碳酸盐岩有效储层段为低密度、物性指示因子高。

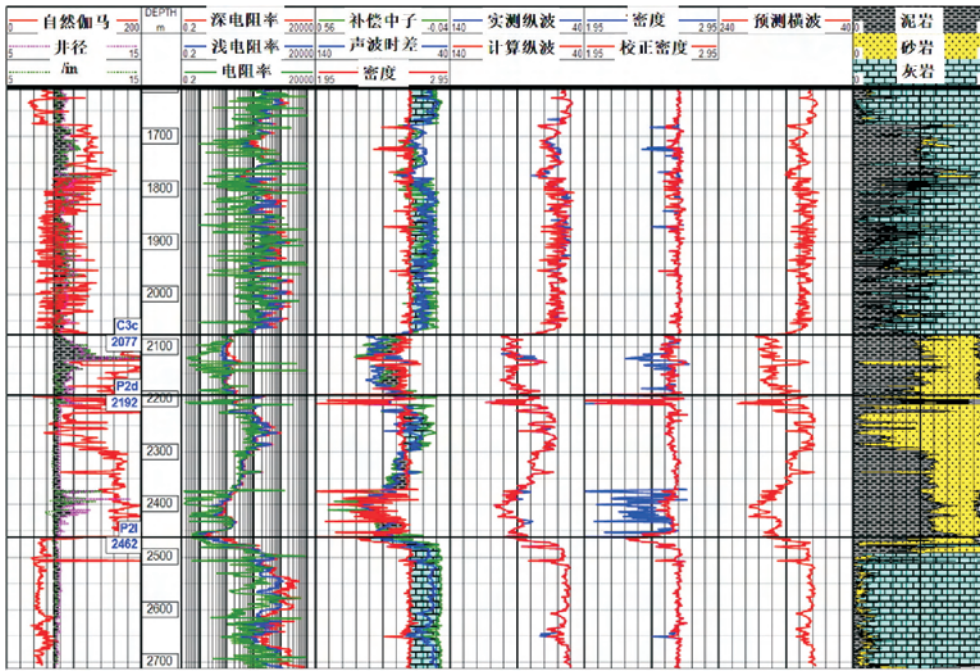


图 5 Xu-White 模型预测 CZ35-2-1 井的纵横波速度曲线

Fig.5 The predicted P&S wave velocity logging of CZ35-2-1 well by Xu-White model

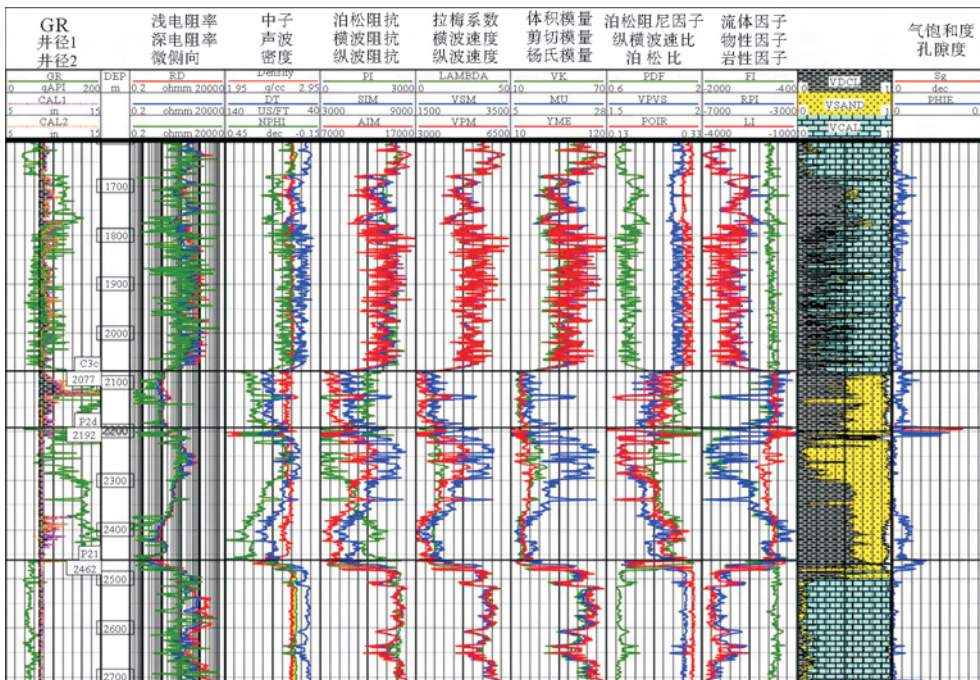


图 6 CZ35-2-1 井碳酸盐岩和碎屑岩的测井曲线

Fig.6 Well logging of carbonate and clastic of well CZ35-2-1

对碳酸盐岩物性的敏感弹性进行分析,通过密度计算孔隙度,发现密度越低,孔隙度越大的特点,但由于本区目的层埋深大,还有次生孔隙缘故,密度与孔隙度之间的线性关系不明显。将物性指示因子与剪切模量进行交汇图(图 7)分析,图中以孔隙度为色标,可以看出物性指示因子越高,孔隙度越大,因此,物性指示因子为研究区块物性敏感弹性参数,利用物性指示因子能够圈定碳酸盐岩有利储层。

4 叠前地震资料分析

4.1 CRP 地震道集预处理

在叠前时间偏移处理后的 CRP 道集上,可以看到很多地震同相轴没有拉平的现象,如图 7a 所示,造成这种现象的原因很多,地层横向速度变化是其中的一个因素。这些现象会给叠前反演后属性分析等带来较大影响,因此,需要进行剩余时差校正,开展道集拉平处理。具体方法是:(1)选择随机噪音小的、靠近小偏移距的一组道进行部分叠加形成参考道;(2)选择一个对于所有偏移距至少包含一个波组的时窗;将该时窗内的所有道与参考道进行互相关,求得每道最大相关系数所对应的时移量;(3)根据相关系数的阈值和时移量阈值剔除掉异常时移值后,得到各道的校正时移量;(4)将校正时移量应用于该时窗数据;(5)时窗沿时间方向滑动至道尾完成

一个道集的处理工作,逐道集处理完成整个工区道集拉平处理工作^[31]。通过一系列的优化处理,如图 7b 充分挖掘叠前地震资料信息的潜力,恢复叠前地震信息,尽可能提高信噪比,使道集质量获得明显的提高,能量更加集中,振幅随偏移距变化关系更加明显,这样的道集更有利于 AVO 分析和叠前同时反演^[29]。

4.2 分角度地震道集子波提取

子波是参与反演运算一个重要参数,进行叠前反演时,通常隐含一个假设,即子波不随偏移距变化(包括振幅、相位和带宽),然而实际上子波是随着偏移距变化的,因此,在进行叠前反演是对每个部分角度叠加地震道集都用它自身合成地震记录的子波来转化。进行子波提取计算的时窗主要在目的层内,子波主频与目的层地震主频一致,子波长度一半为地震采样间隔的整数倍,根据子波的形态、振幅谱及相位谱对提取的子波进行质量分析,提取的子波具有波形稳定且频域内为单峰的特征^[32]。本次采用了 4 个部分叠加地震道集方案(图 9a),并且对井进行分角度提取子波,各个子波形态如图 9b。

4.3 低频模型建立

由于大地低通滤波作用,实际采集到的地震数据频带较窄,不仅难以获得较高的频率成分,同时也缺少甚低频数据,低频模型的建立也是叠前同时反

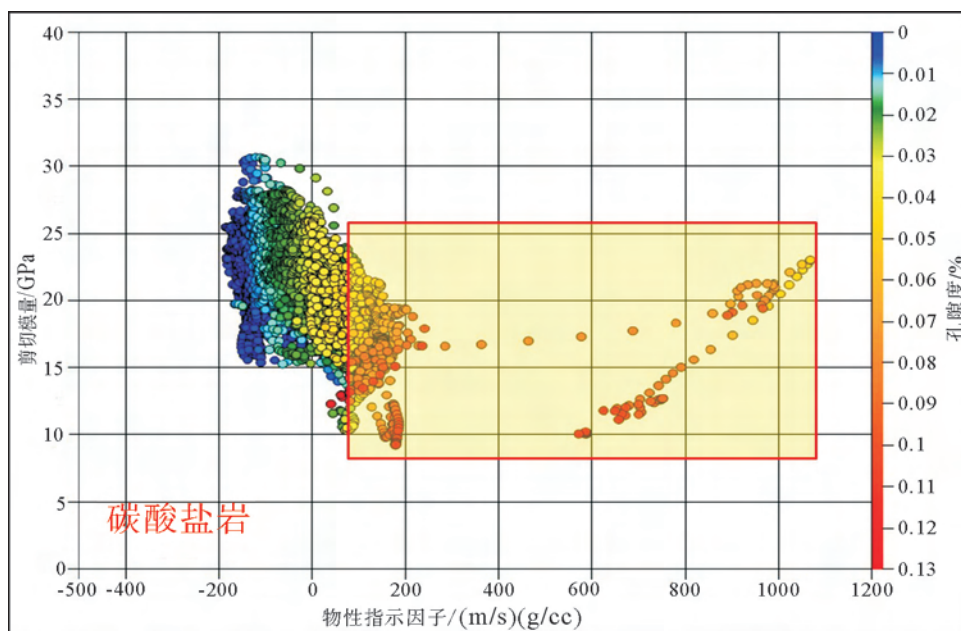


图 7 CZ35-2-1 井 碳酸盐岩物性敏感弹性参数交汇图

Fig.7 Crossplot of carbonate physical property sensitive elastic parameters of well CZ35-2-1

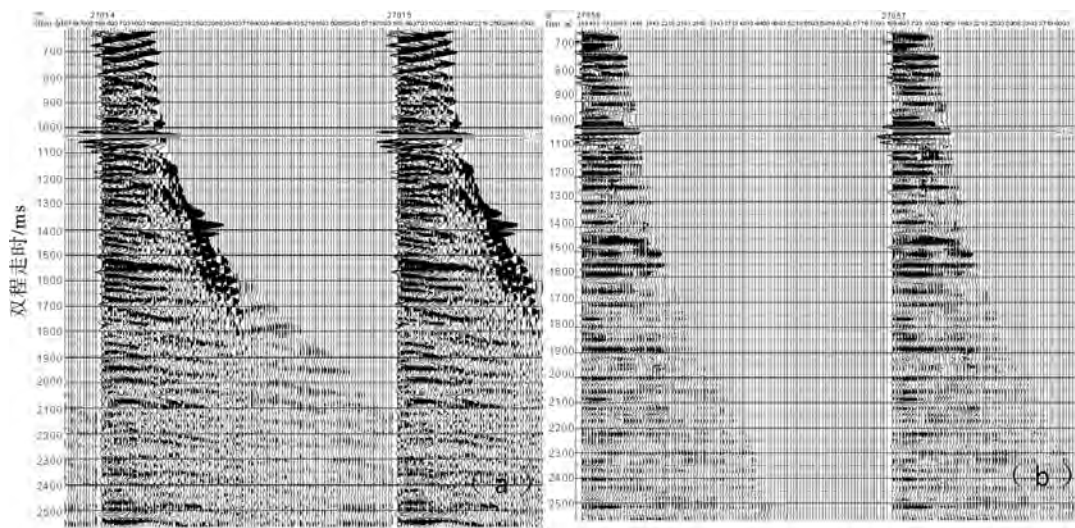


图8 原始CRP地震道集(a)和优化后CRP地震道集(b)
Fig.8 Original CRP seismic gather(a)and optimized CRP seismic gather(b)

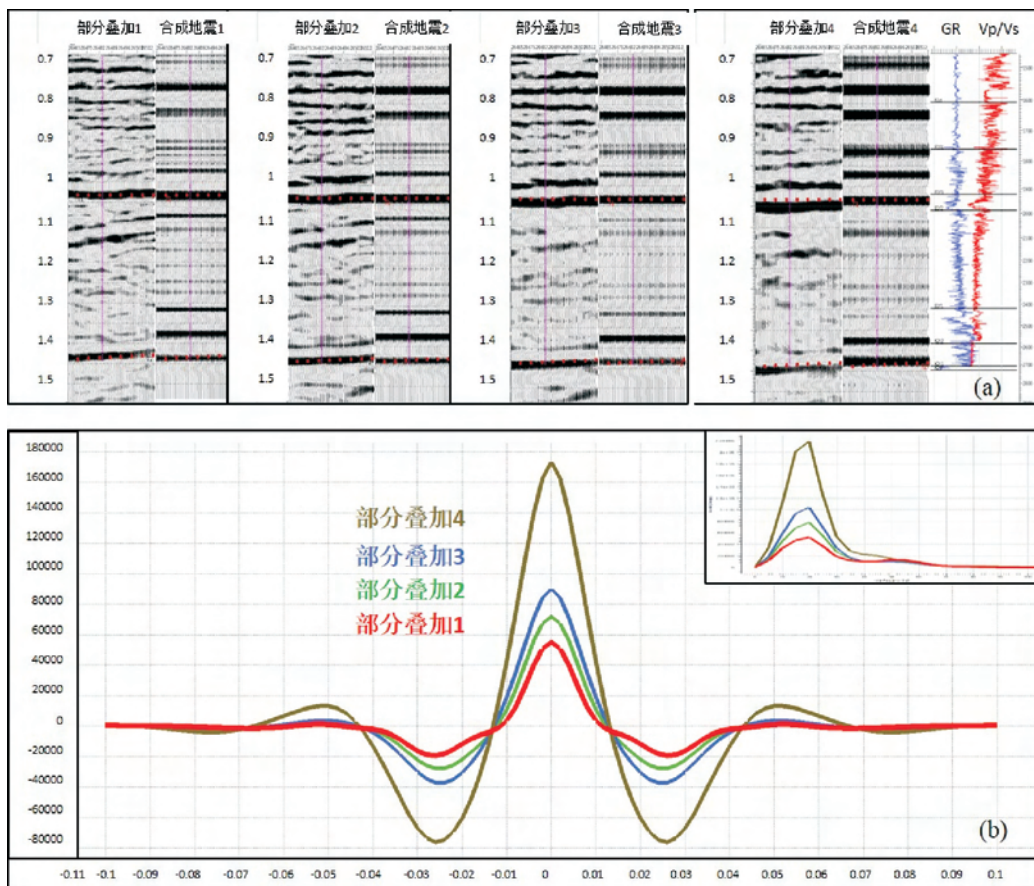


图9 分角度叠加合成地震记录(a)及提取的子波(b)
Fig.9 Angle stacking synthetic seismogram(a) and the extraction of wavelet(b)

演的一个重要环节。如何建立低频模型,主要由两个关键步骤组成:构建构造格架和采用插值方式对格架进行属性填充^[33]。其中建立构造格架是分析地层的沉积模式和层位接触关系,按照地层沉积的

顺序从下向上逐层依次搭建,由于南黄海存在多期的逆冲断层构造,上下盘地层叠置严重,断层倾角变化较大而严重影响了阻抗反演的精度,本文采用了层位分开建模的方法,并通过将断层转换为层位与

地层相融合来建立初始的地层格架模型^[34]。同时由于目前勘探的钻井最深钻到志留系地层,对于往下的地层属性无法确定的情况下,对 CRP 地震道集进行层析速度分析的基础上提取虚拟井,对以上横波预测结果与纵波进行关系式拟合,求取虚拟井的横波速度,并采用 GARDNER 公式将纵波速度转化为

密度,将虚拟井进行合成地震记录后,对地震进行带限阻抗反演,经过多次迭代,最终得到的纵波阻抗低频模型(图 10a)、横波阻抗低频模型(图 10b)和密度低频模型(图 10c),可以看出,建立的低频模型符合本区碳酸盐岩和碎屑岩的纵波阻抗、横波阻抗以及密度的分布。

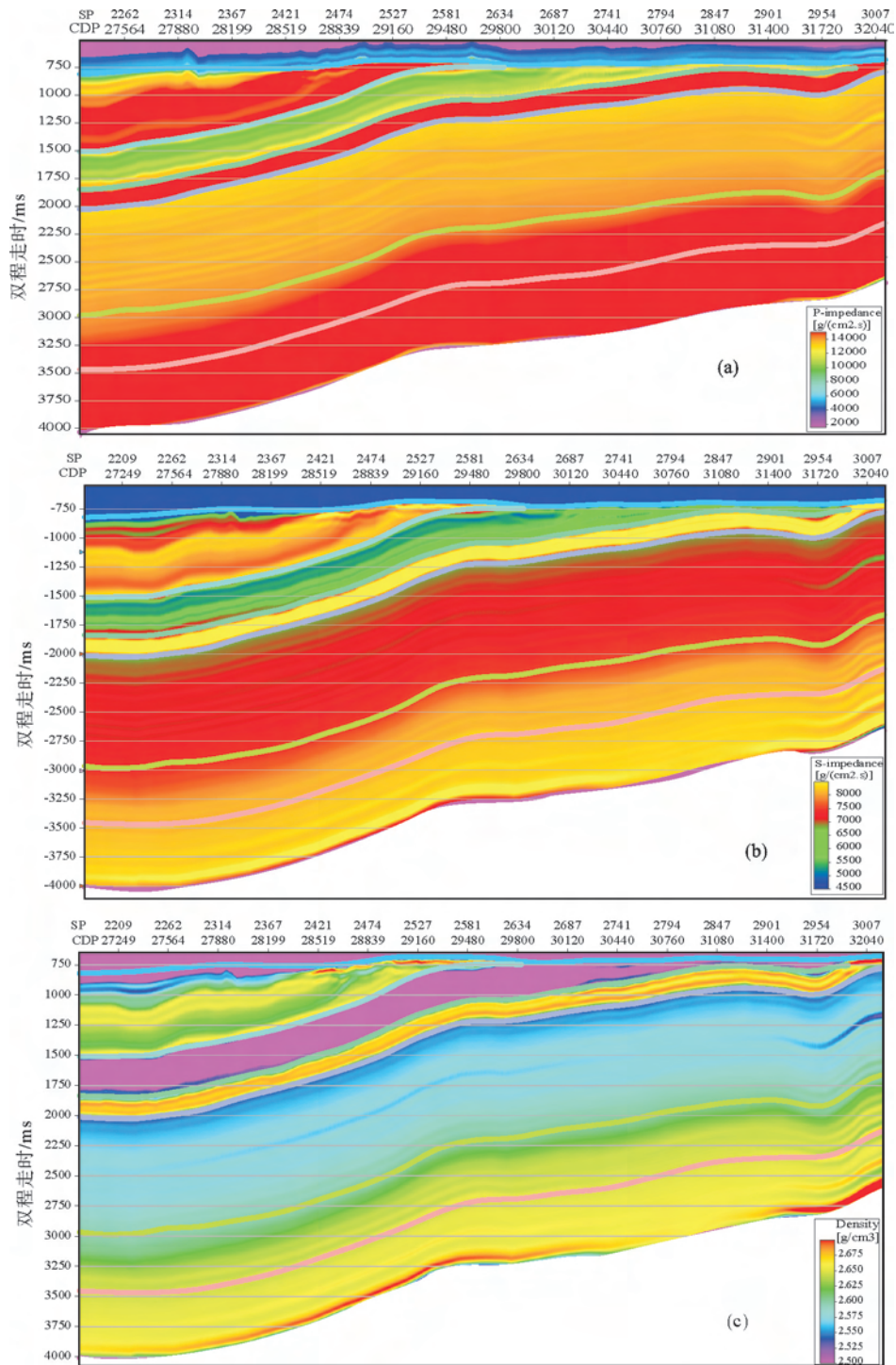


图 10 层析速度分析和虚拟井带限阻抗反演结合建立的低频模型
(a) 低频纵波阻抗模型; (b) 低频横波阻抗模型; (c) 低频密度模型

Fig.10 Low frequency model combined with tomographic velocity analysis and the virtual wells of band limited impedance inversion

5 叠前同时反演结果分析

利用分角度叠加地震道集资料,以及纵波阻抗、横波阻抗和密度低频模型的约束下进行叠前同时反演,得到纵波阻抗、横波阻抗和密度体,根据公式(8)转换得到物性指示因子(RPI)剖面(图 11),红色代表物性好,蓝色代表物性差,黄色的物性处于中等。由图中可以看出总体上碳酸盐岩的物性较好,尤其是位于古高地的局部发育风化壳、淋滤带、白云岩,其孔、洞、缝比较发育,能够提高碳酸盐岩储层的孔隙条件,易形成有利的储层。上震旦统灯影组(Z_2d)白云岩处于蒸发潮坪相,以溶蚀孔、粒间孔和粒内孔的储集空间发育,物性较好;中-上寒武统一奥陶系($C_{2-3}-O$)灰岩除了发育风化壳,还有溶蚀孔和洞缝型储层,以及后期构造裂缝为主要储集空间,缝洞呈

层状分布;石炭系-下二叠统($C-P_{1q}$)碳酸盐岩储层风化壳和滩相都较为发育,发育有瘤状灰岩和生物碎屑灰岩,石炭系和栖霞组顶面由于海西运动遭受风化剥蚀,存在岩溶风化壳,具有一定的孔隙发育。

总的来说,叠前同时反演结果反映的物性剖面具有横向变化分布特征,由于受古构造等地质因素影响,位于古高地为局限台地相沉积,处于高潮面和最大风暴面之间,大部分时间暴露于海平面之上,受气候影响比较大,海水蒸发引起盐度高,并且水循环受限制,灰岩地层容易发生交代作用形成间歇性白云岩,后期由于淡水淋滤作用,易形成岩溶型储层,提高孔隙空间,因此古高地的孔隙度相对较大,位于凹陷带主要沉积了泥晶灰岩或者泥质灰岩,水体能量低,可能为安静的海相或泻湖相沉积,孔隙度相对较小。碳酸盐地层由于后期的构造运动形成或裂缝也会改造储层的孔隙空间,使得孔隙度也有所提高。

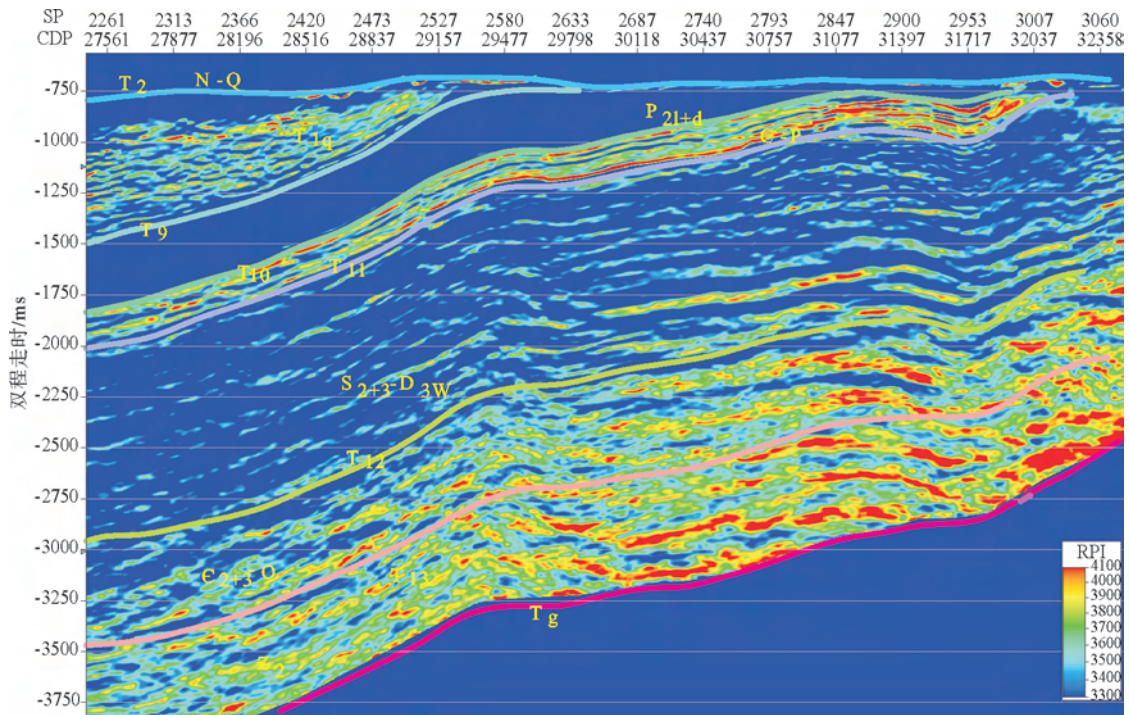


图 11 叠前反演结果的物性剖面

Fig.11 The physical property section from pre-stack inversion

6 结论

(1) 根据岩石物理分析结果,发现碳酸盐岩相对碎屑岩具有高阻抗和高泊松比,物性指示因子对碳酸盐岩孔隙度比较敏感,物性指示因子越高,孔隙度越大,因此,物性指示因子可作为碳酸盐岩物性定

量判别标准;

(2) 通过对南黄海碳酸盐岩叠前同时反演,其结果对碳酸盐岩物性具有很好的指示作用,物性较好的局部地区说明发育有风化壳、林滤带和白云岩地层,由于孔、洞、缝比较发育,碳酸盐岩的孔隙条件发育较好,易形成有利储层;

(3) 碳酸盐岩的分布受沉积、成岩和构造控制

作用,位于古高地的局限台地相碳酸盐岩由于交代作用形成白云岩,由于淡水淋滤作用,易形成岩溶型储层,加上后期的构造运动,裂缝的发育一定程度上提高孔隙空间。

(4) 叠前同时反演方法依赖于精确的速度,因研究区地震资料品质相对较差,深部钻井较少,特别是缺少震旦-奥陶系的钻井资料,深部储层反演存在一定误差。若相关资料不断完善、品质不断提升,可以进一步提升反演精度。

参考文献 (References)

- [1] 纪友亮,周勇,王改为,等.下扬子地区古生界海相碳酸盐岩层序地层发育模式及储层预测[J].石油与天然气地质,2011,32(5):724-732,786. [JI Youliang, ZHOU Yong, WANG Gaiwei, et al. Sequence stratigraphic models and reservoir prediction of the Paleozoic marine carbonates in the Lower Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 724-732, 786.]
- [2] 祁江豪.南黄海地区地壳速度结构研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2015. [QI Jianghao. Research on the crustal velocity structure in the Southern Yellow Sea[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2015.]
- [3] 吴淑玉,刘俊,肖国林,等.地震多属性预测技术在南黄海二叠系至三叠系沉积分析中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):109-116. [WU Shuyu, LIU Jun, XIAO Guolin, et al. Application of seismic attribute analysis to the Permian-Triassic deposits in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 109-116.]
- [4] 吴淑玉,陈建文,梁杰,等.南黄海海相中-古生界碳酸盐岩储层特征及成藏模式——对比四川盆地和苏北盆地[J].海洋地质前沿,2016,32(1):13-21. [WU Shuyu, CHEN Jianwen, LIANG Jie, et al. Characteristics of Mesozoic-Palaeozoic Marine carbonate reservoir in the South Yellow Sea basin and hydrocarbon accumulation: Comparison between the Sichuan basin and the Subei basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 13-21.]
- [5] 陈建文,施剑,刘俊,等.南黄海海相中-古生界地震地质条件[J].海洋地质前沿,2016,32(10):1-8. [CHEN Jianwen, SHI Jian, LIU Jun, et al. Seismic geological conditions of the marine Meso-paleozoic in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(10): 1-8.]
- [6] 陈建文,龚建明,李刚,等.南黄海盆地海相中-古生界油气资源潜力巨大[J].海洋地质前沿,2016,32(1):1-7. [CHEN Jianwen, GONG Jianming, LI Gang, et al. Great resources potential of the marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 1-7.]
- [7] 吴志强,刘丽华,肖国林,等.南黄海海相残留盆地综合地球物理调查进展与启示[J].地球物理学进展,2015,30(6):2945-2954. [WU Zhiqiang, LIU Lihua, XIAO Guolin, et al. Progress and enlightenment of integrated geophysics exploration of marine residual basin in the South Yellow Sea[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2945-2954.]
- [8] 梁杰,张银国,董刚,等.南黄海海相中-古生界储集条件分析与预测[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):101-108. [LIANG Jie, ZHANG Yinguo, DONG Gang, et al. A discussion on marine Mesozoic-Palaeozoic reservoirs in South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 101-108.]
- [9] 梁杰.构造作用对南黄海盆地三叠系青龙组储层的影响[J].海洋地质前沿,2014,30(10):57-61. [LIANG Jie. Tectonic effects on the reservoir in Qinglong formation of the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(10): 57-61.]
- [10] 李旭彤,吴志强,张训华.地震属性分析在南黄海盆地北部坳陷白垩系油气地质特征研究中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):119-126. [LI Xutong, WU Zhiqiang, ZHANG Xunhua. Petroleum geology of the cretaceous in the Northern depression of South Yellow Sea basin: Evidence from seismic attribute analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(6): 119-126.]
- [11] 吴志强,陆凯.南黄海沉积层纵波速度与地震反射特征[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(2):73-77. [WU Zhiqiang, LU Kai. Characteristics of P-wave velocity and seismic reflection of the sedimentary layer in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2): 73-77.]
- [12] 雷宝华,陈建文,李刚,等.南黄海盆地二叠系地震地层特征与识别[J].海洋地质前沿,2016,32(1):29-34. [LEI Baohua, CHEN Jianwen, LI Gang, et al. Seismic stratigraphic features and recognition of the Permian in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 29-34.]
- [13] 刘俊,吴淑玉,陈建文,等.地震初至波速度层析成像技术在南黄海盆地崂山隆起的应用[J].海洋地质前沿,2016,32(10):18-23. [LIU Jun, WU Shuyu, CHEN Jianwen, et al. Application of seismic first arrival velocity of tomography imaging to Laoshan uplift of the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(10): 18-23.]
- [14] 蒋炼.碳酸盐岩储层结构刻画与流体识别——以DW地区珠江组地层为例[D].成都理工大学硕士学位论文,2011. [JIANG Lian. The description of reservoir structure and identification of fluid in carbonate rock——A case study of Zhujiang formation in the DW Area[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2011.]
- [15] 余鹏.叠前反演技术及其应用[J].山东工业技术,2014(10):72. [YU Peng. The technique and application of the prestack inversion[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(10): 72.]
- [16] 苑书金.叠前地震反演技术的进展及其在岩性油气藏勘探中的应用[J].地球物理学进展,2007,22(3):879-886. [YUAN Shujin. Progress of pre-stack inversion and application in exploration of the lithological reservoirs[J]. Progress

- in Geophysics, 2007, 22(3): 879-886.]
- [17] Zoeppritz K. On the reflection and penetration of seismic waves through unstable layers[J]. Goettinger Nachrichten, 1919, 1(7B): 66-84.
- [18] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology, Theory and Method[M]. New York: W. H. Freeman, 1980: 144-154.
- [19] 孟宪军, 姜秀娣, 黄捍东, 等. 叠前 Ava 广义非线性纵、横波速度反演[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6): 645-650. [MENG Xianjun, JIANG Xiudi, HUANG Handong, et al. Generalized non-linear P wave and S wave velocity inversion of prestack AVA[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(6): 645-650.]
- [20] Fatti J L, Smith G C, Vail P J, et al. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. Geophysics, 1994, 59(9): 1362-1376.
- [21] 刘涛, 樊小意, 方中于, 等. 湘西南地区地震数据叠前同步反演[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 180-185. [LIU Tao, FAN Xiaoyi, FANG Zhongyu, et al. Pre-stack simultaneous inversion of seismic data in Weixi'nan area[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(2): 180-185.]
- [22] 梁立锋, 刘秀娟, 但志伟, 等. 利用叠前密度反演预测岩性的应用研究[J]. 海洋石油, 2011, 31(2): 53-58. [LIANG Lifeng, LIU Xiujuan, DAN Zhiwei, et al. Application research on using prestack density inversion to predict lithology [J]. Offshore Oil, 2011, 31(2): 53-58.]
- [23] 肖为, 但志伟, 孙雷鸣, 等. 叠前同步反演技术在莺歌海盆地超压地层中的应用[J]. 西藏科技, 2012(6): 29-33. [XIAO Wei, DAN Zhiwei, SUN Leiming, et al. application of Prestack simultaneous inversion technique in Yinggehai basin overpressure formation[J]. Tibet's Science & Technology, 2012(6): 29-33.]
- [24] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 571-581.
- [25] Gardner G H F, Gardner L W, Gregory A R. Formation velocity and density: The diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [26] 郎晓玲, 彭仕宓, 康洪全, 等. 叠前同时反演方法在流体识别中的应用[J]. 石油物探, 2010, 49(2): 164-169. [LANG Xiaoling, PENG Shimi, KANG Hongquan, et al. Application of prestack simultaneous inversion in fluid identification[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(2): 164-169.]
- [27] 苏世龙, 贺振华, 王九栓, 等. 利用叠前弹性参数同时反演预测储层的含油气性[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1008-1013. [SU Shilong, HE Zhenhua, WANG Jiushuan, et al. The application of pre-stack simultaneous inversion to prognosis of gas and oil potential in the reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1008-1013.]
- [28] 朱江梅, 方中于, 李勇, 等. W 地区珠海组岩石物理特征及应用研究[J]. 矿物岩石, 2014, 34(2): 113-120. [ZHU Jiangmei, FANG Zhongyu, LI Yong, et al. Study and application of rock physical properties the Zhuhai formation in W district[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(2): 113-120.]
- [29] 陈昌. 叠前储层预测技术在清水地区致密砂岩油气勘探中的应用[J]. 化学工程与装备, 2014(3): 104-106, 452. [CHEN Chang. Application of prestack reservoir prediction technology in the tight sandstone oil & gas exploration in the Qingshui area[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014(3): 104-106, 152.]
- [30] 吴淑玉, 陈建文, 刘俊, 等. 南黄海横波测井曲线预测在叠前反演中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(10): 51-59. [WU Shuyu, CHEN Jianwen, LIU Jun, et al. Application of S-wave well logging predicted for prestack inversion in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(10): 51-59.]
- [31] 刘俊, 吴淑玉, 高金耀, 等. 南黄海中部浅水区多次波衰减技术及其效果分析[J]. 物探与化探, 2016, 40(3): 568-577. [LIU Jun, WU Shuyu, GAO Jinyao, et al. An effectiveness analysis of multiple depression technique in the shallow water of the Central uplift in South Yellow Sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 568-577.]
- [32] 刘俊, 吴淑玉. 分时窗合成地震记录方法在南黄海的应用[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(10): 53-58. [LIU Jun, WU Shuyu. Application of multi-time-window synthetic seismograms in South Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(10): 53-58.]
- [33] 秦广胜. 基于叠前地震反演的储层表征技术研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2014. [QIN Guangsheng. The study on reservoir characterization technology based on prestack seismic inversion[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2014.]
- [34] 陈祥忠, 姚军. 逆冲推覆带储层波阻抗反演方法研究[J]. 世界地质, 2016, 35(2): 503-509. [CHEN Xiangzhong, YAO Jun. Research on impedance inversion of reservoir in thrust nappe belt[J]. Global Geology, 2016, 35(2): 503-509.]