

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.03.018

南黄海崂山隆起石炭系-下二叠统海相碳酸盐岩叠前三参数反演储层预测

刘俊^{1,2,3}, 陈建文^{1,2}, 吴淑玉^{1,2}, 张银国^{1,2}, 施剑^{1,2}, 刘鸿^{1,2}, 苑春方⁴

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. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要: 崂山隆起为南黄海盆地的构造稳定区, 中-古生代海相地层存在较好的油气前景, 但其构造复杂, 地震资料信噪比低等缘故制约了油气勘探进程。该文采用类比方法, 运用相同沉积演化历史环境的四川盆地测井和地震资料作为研究样本, 分析碳酸盐岩储层测井和地震响应特征, 建立南黄海古生界海相碳酸盐岩地震相和储层分布特征。根据简化的 Zoeppritz 方程引入岩石弹性模量, 对南黄海崂山隆起地震测线进行叠前三参数反演, 获得相对密度、体积模量和剪切模量数据体, 沿着研究目的层提取以上 3 种属性参数进行 3D 聚类分析, 再反投到地震剖面上获得地震相, 在地震相的控制下再次进行聚类交互, 分别获得各地震相下有利储层的空间分布情况。通过分析, 南黄海崂山隆起下二叠世和石炭纪时期主要发育局限台地相、开阔台地相、台地边缘浅滩相和台地边缘生物礁相 4 种沉积相, 相应发育岩溶型白云储层和礁、滩相储层, 储层受沉积环境影响较大, 但后期的构造运动对储层孔隙也有一定的改造作用。

关键词: 叠前三参数反演; 储层预测; 南黄海; 崂山隆起; 海相碳酸盐岩

中图分类号: P738 **文献标识码:** A

Prestack three-term seismic inversion for prediction of Carboniferous-lower Permian carbonate reservoir on the Central uplift of South Yellow Sea basin

LIU Jun^{1,2,3}, CHEN Jianwen^{1,2}, WU Shuyu^{1,2}, ZHANG Yinguo^{1,2}, SHI Jian^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, YUAN Chunfang⁴

1. The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China
3. College of Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract: The Central Uplift of the South Yellow Sea Basin is a stable tectonic unit, of which the Mesozoic- Paleozoic marine deposits are expected as possible oil and gas prospects. However, oil and gas exploration is limited up to date due to complex structure and lack of high quality seismic data. Following the principles of comparative geology, well logging and seismic data from the Sichuan Basin are adopted in this paper as a reference for comparison, where the evolution of depositional environment is similar to the South Yellow Sea Basin to certain extent. We analyzed the logging and seismic responses of the carbonate reservoirs and worked out the seismic facies and reservoir distribution pattern of the Paleozoic marine facies in the South Yellow Sea Basin by application of prestack three-term seismic inversion based on simplified Zoeppritz equation. Extracted are the data of relative density, volume modulus and shear modulus. The three kinds of seismic attributes mentioned above are then extracted from the target layer for 3D clustering analysis, which is used for classification of seismic facies in the seismic profiles. Under the control of different seismic facies, 3D clustering interactions is performed for the three-term seismic parameters, and obtained is the favorable reservoir space. Based on above mentioned analysis, it is found that in the Late Permian and Carboniferous period there mainly developed the four kinds of facies as restricted platform, open plat-

资助项目: 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); 青岛市市南区科技发展基金项目基金“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); 中国地质调查项目“南黄海海域油气资源普查”(GZH200800503)、“南黄海油气资源调查”(DD20160152); 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: 刘俊(1978—), 男, 高级工程师, 在读博士, 从事海洋地球物理相关工作, E-mail: vnlj@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: 2016-05-20; **改回日期:** 2016-06-20. 蔡秋蓉编辑

form, platform edge bank and platform edge reefs. And the reservoirs of karstic dolomite, reef and carbonate flat will develop on the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin. Sedimentary environment has great impact to reservoir characteristics, but the later tectonic movement will render certain effect on the reservoir pore space.

Key words: prestack three-term seismic inversion; reservoir prediction; the South Yellow Sea Basin; Central uplift; marine carbonate

崂山隆起为南黄海盆地的构造稳定区,也是下扬子区面积最大的稳定区块^[1, 2],类比下扬子苏浙皖的勘探研究成果,崂山隆起及邻区的中-古生代海相地层具有区域性分布且有机质丰富的主力成熟烃源岩有 3 套,分别为下寒武统幕府山组、下志留统高家边组和下二叠统栖霞组(含孤峰组)^[3-5],表明该区古生代海相地层存在较好的油气前景^[6-8]。随着鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、四川盆地和渤海湾等大型碳酸盐岩油气田的发现^[9-11],碳酸盐岩勘探是我国近期油气勘探开发和储值上产的重要领域之一^[12-14],但碳酸盐岩特殊的成因机制决定了其储层预测的难度远大于碎屑岩^[15, 16],另外碳酸盐岩储层

预测也是崂山隆起乃至南黄海盆地油气勘探的重点和难点问题。为了对该区碳酸盐岩储层开展有效的储层预测,笔者借助具有相同沉积环境的四川盆地测井和地震资料作为研究样本,分析碳酸盐岩储层响应特征,开展叠前三参数反演方法,建立南黄海崂山隆起碳酸盐岩地震相和储层分布特征。

1 叠前三参数反演方法原理

地震资料经过特殊处理后,对提高信噪比的地震数据按照远、中、近地震道进行部分叠加,一般采用由 Zoeppritz 方程:

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\varphi_1 & -\sin\theta_2 & \cos\varphi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\varphi_1 & \cos\theta_2 & \sin\varphi_2 \\ \cos 2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1} \sin 2\varphi_1 & \frac{\rho_2 \beta_2^2 \alpha_1}{\rho_1 \beta_1^2 \alpha_2} \cos \theta_2 & \frac{\rho_2 \beta_2 \alpha_1}{\rho_1 \beta_1^2} \sin \varphi_2 \\ \cos 2\varphi_1 & -\frac{\beta_1}{\alpha_1} \cos 2\varphi_1 & -\frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1} \cos 2\varphi_2 & -\frac{\rho \beta_2}{\rho_1 \alpha_1} \sin 2\varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 \\ \cos 2\theta_1 \\ -\cos 2\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_{PP} 为纵波反射系数, R_{PS} 为横波反射系数, T_{PP} 为纵波透射系数, T_{PS} 为横波透射系数, $\alpha_1, \beta_1, \rho_1$ 为上层介质的纵波速度、横波速度和密度; $\alpha_2, \beta_2, \rho_2$ 为下层介质的纵波速度、横波速度和密度; $\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2$ 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 方程进行简化,得到 Aki-Richard 近似表达式,得到了当弹性参数的相对变化 $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}, \frac{\Delta\beta}{\beta}, \frac{\Delta\rho}{\rho}$ 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,即:

$$\begin{aligned} R_p(\theta) &= A + B \sin^2 \theta \frac{\Delta\rho}{\rho} + C \tan^2 \theta \sin^2 \theta \\ A &= R_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \\ B &= \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \left(\frac{\Delta\beta}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta\beta}{\varphi} - 2 \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ C &= \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, α, β, ρ 分别为界面两侧的纵波速度、横波速

度和密度的平均值, $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\rho$ 分别为界面两侧纵波速度、横波速度和密度的差值, θ 为入射纵波的入射角的平均值, φ 为透射纵波的透射角的平均值。

由于地震波在地下岩石中传播的速度是由岩石的弹性模量和密度决定的,将(2)式的速度可用弹性模量和密度代替:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \\ \beta = \sqrt{\frac{(\kappa + 4/3\mu)}{\rho}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 μ 剪切模量,单位为 GPa; κ 为体积模量,单位为 GPa。通过将(3)式带入(2)并求解,分别求得 μ, κ 和 ρ ,而且 3 个参数之间为非线性:

$$R_p(\theta) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{\kappa + 4\mu/3}} \sec^2 \theta + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4\mu \sin^2 \theta}{\kappa + 4\mu/3} \right) \frac{1}{\rho} - \frac{4\sqrt{\rho\mu}}{\kappa + 4\mu/3} \sin^2 \theta \quad (4)$$

由(3)式可以看出,非线性的三个参数 μ, κ 和 ρ 能够直接反应岩石弹性介质的地震响应特征,通

通过对地震共深度点道集(CRP)的进行远角度、中角度、近角度地震道集代入(4)式叠加,获得剪切模量、体积模量和密度参数,作为地震相划分和储层特征的标识,满足在岩性变化剧烈区域和有效储层预测,其精度高于其他二维地震的 AVO 弹性反演方法。

2 区域地质背景

南黄海位于下扬子板块的东北部,以成山头至翁津一线为北界与北黄海相连,南以济州岛与启东咀连线为界与东海相连,东与朝鲜半岛相连,海盆面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。南黄海盆地北以千里岩隆起,南与勿南沙隆起为界,从北往南可分为烟台拗陷、崂山隆起和青岛拗陷 3 个二级构造单元^[17-20](图 1),为中国近海潜在的油气勘探领域之一,但由于构造比较复杂、地震资料信噪比低等原因使得地震勘探程度低,制约了油气勘探进程^[21]。2015 年在南黄海

盆地崂山隆起采集的地震资料采用了 6390 in^3 大容量震源,震源和电缆分别为 10m 和 16m 的沉放深度组合,有效地提高了地震的低频能量^[22, 23],处理过程中采用 DWD、SRME 和高精度 Radon 进行多次波压制^[24],采用初至波层析反演很好揭示了高速屏蔽层下的地层速度变化^[25],叠前时间偏移和叠前深度偏移方法使得地震成像效果比往年获得更好的品质,为本区碳酸盐岩储层预测提供了可靠的地震资料。

与南黄海同处扬子块体的上扬子四川盆地中古生代海相地层分布面积广、厚度大,近几年威远、五百梯、元坝和安岳地区发现了大型古生代碳酸盐岩油气田^[26-28]。地质露头、钻探和物探资料证明下扬子南黄海中-古生代海相地层的沉积演化与上扬子四川盆地具有共同的特点^[29]。整个扬子板块在震旦纪-中晚三叠世期间,构造运动较为稳定,接受了一套海相碳酸盐岩为主的地台沉积建造,形成了

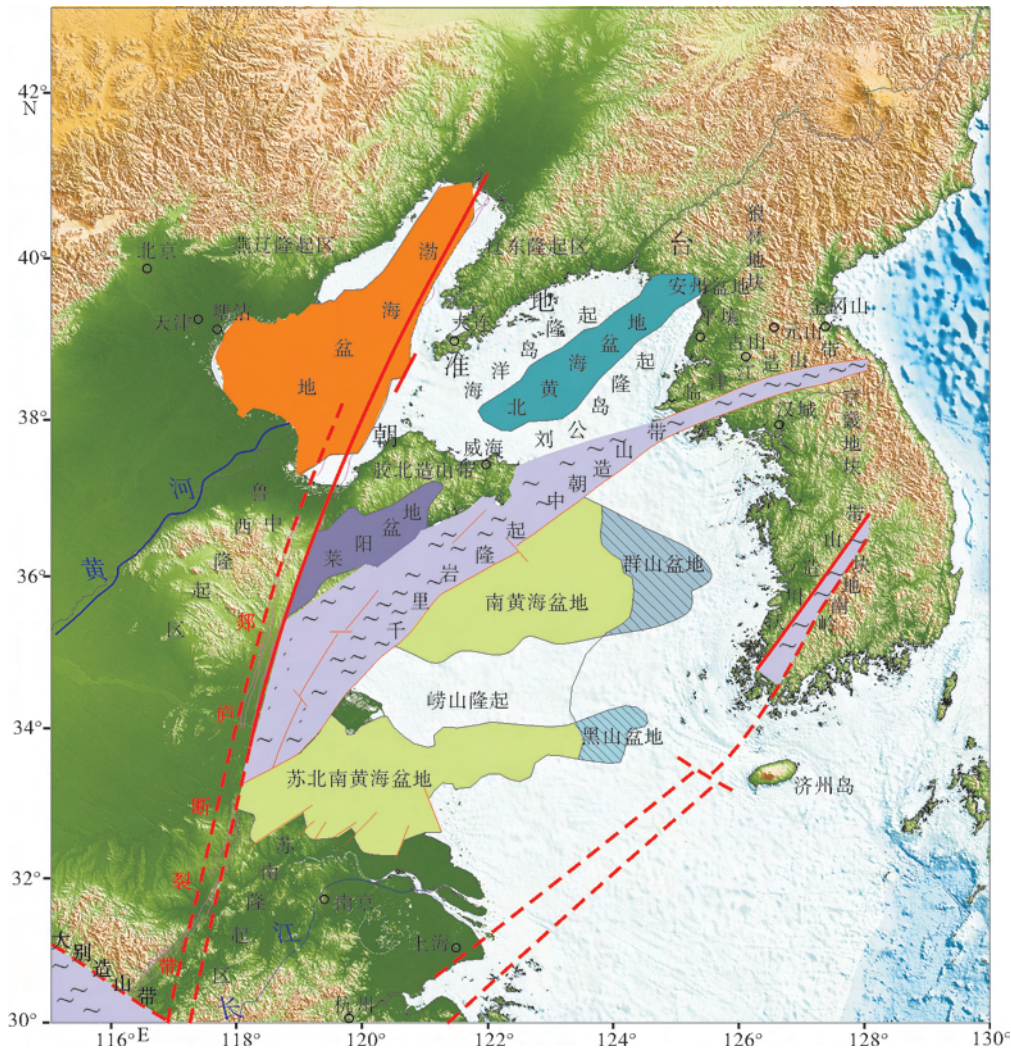


图 1 南黄海盆地构造区域图(据文献[31])

Fig.1 Tectonic map of South Yellow Sea basin

海相中-古生代沉积盆地^[30]。下寒武统下部发育大量黑色、暗色泥页岩,上部以碳酸盐岩为主,中寒武统至奥陶系主要发育碳酸盐岩,志留系和泥盆系以碎屑岩为主,其中晚奥陶世至早志留世期间发育较好的烃源岩,石炭纪开始到中三叠世发育碳酸盐岩沉积。印支期扬子块体向华北块体的拼贴碰撞使得南黄海盆地整体抬升,遭受强烈的挤压、逆冲、剥蚀和岩浆作用,大量海相地层被卷入逆冲推覆,受到严重的破坏,出现大面积缺失。四川盆地海相地层上覆为较为连续沉积的中-新生代陆相地层,且与海相地层之间为假整合接触,厚度巨大,上古生代地层发育比较完整^[29]。

南黄海盆地与四川盆地同处扬子块体内,总体来说,古生代期间两地区的构造演化史可称为“大同多异”,两者具备相同的基底,沉积相和地层岩性特征十分类似,经历了相同的构造运动改造,只是在改造的规模、形式、时间上存在一些差异,发育了层位大致相同或相似的烃源岩、储层和盖层(南黄海盆地三叠系盖层为泥质岩,四川及苏北地区以膏岩盖层为主),海相油气藏生储盖组合相似。

3 岩石物理分析

3.1 类比区地层分析

崂山隆起由于缺少钻井和测井资料,而四川盆地与南黄海盆地具有相似的海相沉积演化史,因此,采用相似储层类比的思路,通过搜集四川盆地相关资料,筛选与南黄海沉积演化环境接近的地震和测井资料作为研究样本,来研究南黄海碳酸盐岩储层的分布规律。

四川盆地的测井资料以二叠系以上资料居多,深部地层的资料相对匮乏。通过分析四川盆地整个寒武系-奥陶系、石炭系-二叠系和三叠系雷口坡组,发现其几套碳酸盐岩储层特点相似,岩性接近,盖层稳定,因此,将龙岗地区三叠系的雷口坡组的测井和岩性资料作为样本进行储层分析。

雷口坡组为浅滩相颗粒白云岩、晶粒白云岩,储层以其良好的孔渗性能、较大规模分布,且及其埋深较浅,为海相油气勘探的主要目的层段。根据四川盆地和鄂西、黔北地区中三叠世地层划分方案,雷口坡组自下而上分为 4 段,分别为雷一段、雷二段、雷三段和雷四段^[32](图 2),由于印支运动,龙岗地区雷

四段保存比较完整,由岩性组合特征由下至上又可分为 3 个亚段,即雷四¹、雷四²和雷四³亚段,根据岩性特征、储层性能、含油气性能和电性特征,雷四³亚段可分为 a、b、c 三个小层。其中上部 a 层为蒸发台地-局限台地相,岩溶作用使得蒸发台地相的膏坪、膏湖微相、台内滩相沉积物在印支期被淡水淋滤溶解、垮塌,部分经过短距离搬运重新固结,形成大量的膏溶垮塌角砾,储层发育最好^[33]。

3.2 储层测井响应特征

储层位于雷四³段上部,储层段岩性为白云岩,非储层段为灰岩或白云岩化程度较差的白云岩。测井曲线在白云岩储层段的特点为低自然伽马背景下的低电阻率、低密度、高声波时差、高中子孔隙度,简称“三低两高”的特点(图 3)。

3.3 测井曲线基质回归

根据 Wyllie 时间平均方程回归测井数据的白云岩和灰岩基质的纵波速度、横波速度、密度、体积模量和剪切模量。

$$\begin{cases} V_p = (1 - \varphi)V_{pm} + \varphi V_{pf} \\ V_s = (1 - \varphi)V_{sm} + \varphi V_{sf} \\ \rho = (1 - \varphi)\rho_m + \varphi\rho_f \\ \kappa = (1 - \varphi)\kappa_m + \varphi k_f \\ \mu = (1 - \varphi)\mu_m + \varphi\mu_f \end{cases} \quad (5)$$

式中 V_p 、 V_s 、 ρ 、 κ 、 μ 分别为饱和流体岩石的纵波速度、横波速度、密度和体积模量和剪切模量, V_{pm} 、 V_{sm} 、 ρ_m 、 κ_m 、 μ_m 分别为基质的纵波速度、横波速度、密度和体积模量和剪切模量, V_{pf} 、 V_{sf} 、 ρ_f 、 k_f 、 μ_f 分别为流体的纵波速度、横波速度、密度和体积模量和剪切模量。

表 1 为葛瑞、马沃可^[34](2008)的岩石物理手册的白云岩基质和灰岩基质弹性模量的理论值,表 2 是根据 Wyllie 时间平均方程回归的白云岩基质和灰岩基质弹性模量值。由两个表可以看出白云岩基质的弹性模量的相对误差最大不超过 21%,灰岩基质的弹性模量的相对误差最大不超过 15%,白云岩主要成分为白云石,灰岩主要成分为方解石,本次平均方程回归的结果与岩石物理手册中给出的白云石和方解石的弹性模量基本接近。由统计结果表明,白云岩基质相对灰岩基质具有高纵波速度、高横波速度、高密度、高剪切模量和高体积模量。

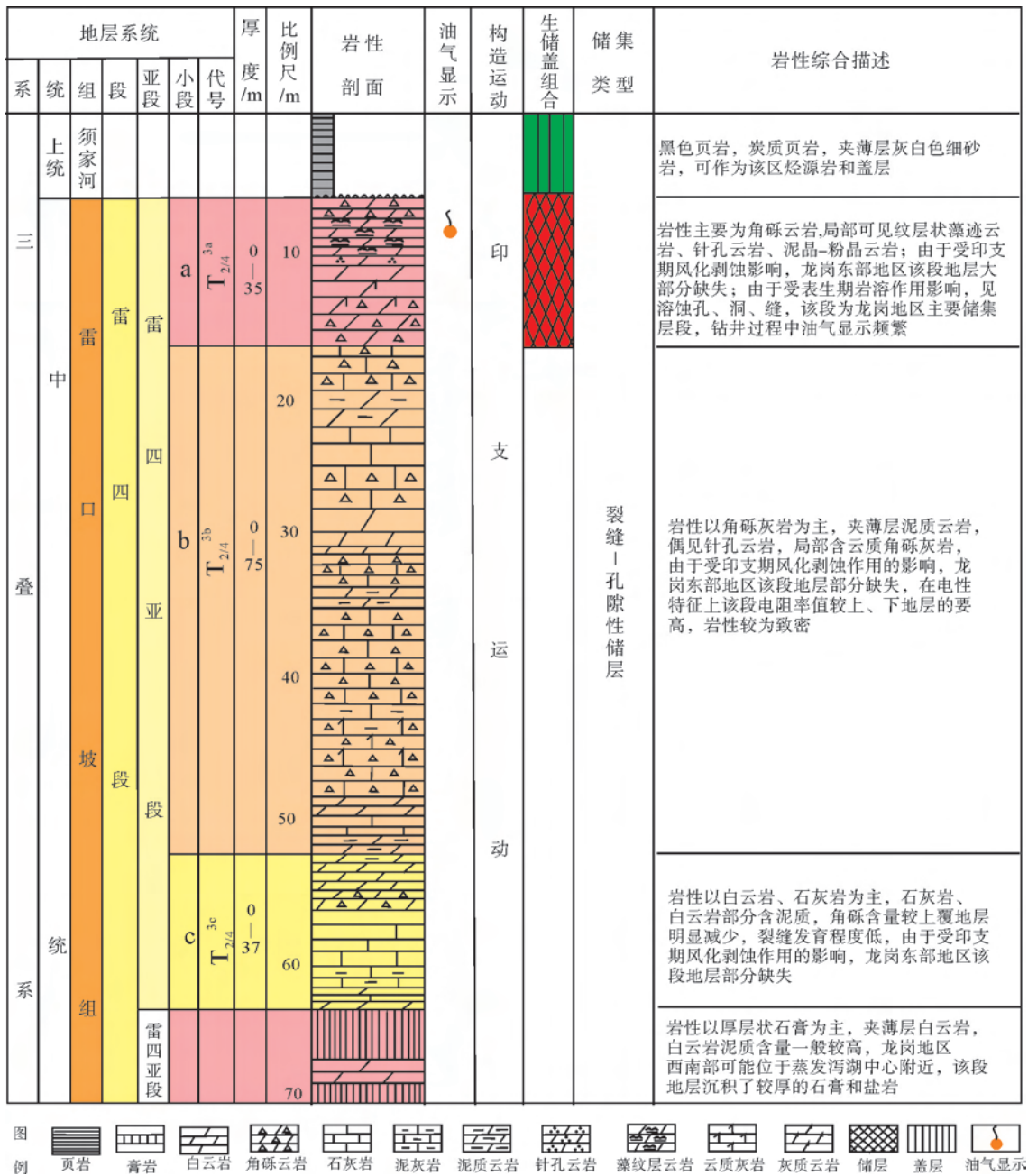


图 2 四川盆地三叠系雷口坡组第四段综合柱状图(据文献[33])
 Fig.2 Integrated stratigraphic columnar of Triassic Leikoupo Group in Longgang area

通过对雷口坡组的测井曲线进行密度、体积模量和剪切模量的计算,并进行 3D 交汇(图 4),图中红色线表示白云岩随孔隙度增加的属性变化方向,蓝色线表示灰岩随孔隙度增加的属性变化趋势,相当于灰岩只有溶蚀没有白云岩化的情况。黑色箭头表示灰岩白云化的方向。通过测井发现,储层随着白云岩化程度不同,孔隙度也发生变化。另外对该区地震数据进行叠前反演的基础上,提取层段的相对密度、体积模量和剪切模量进行 3D 交汇,可以看出地震反演结果与测井分析结果的储层和非储层弹性参数属性特征是一致的,因此,采用三参数 3D 聚

类方法对储层和非储层进行预测是可行的。

4 叠前三参数反演

4.1 地震资料预处理

AVO 技术的基础是反射系数随入射角的变化与界面上、下岩层的弹性参数有关,通过 AVO 反演方法能够从地震道中提取分辨维度较高的地震属性参数,利用这样的地震属性参数识别储层或油气分布,能够得到比叠后反演更为可靠的结果^[35]。由于

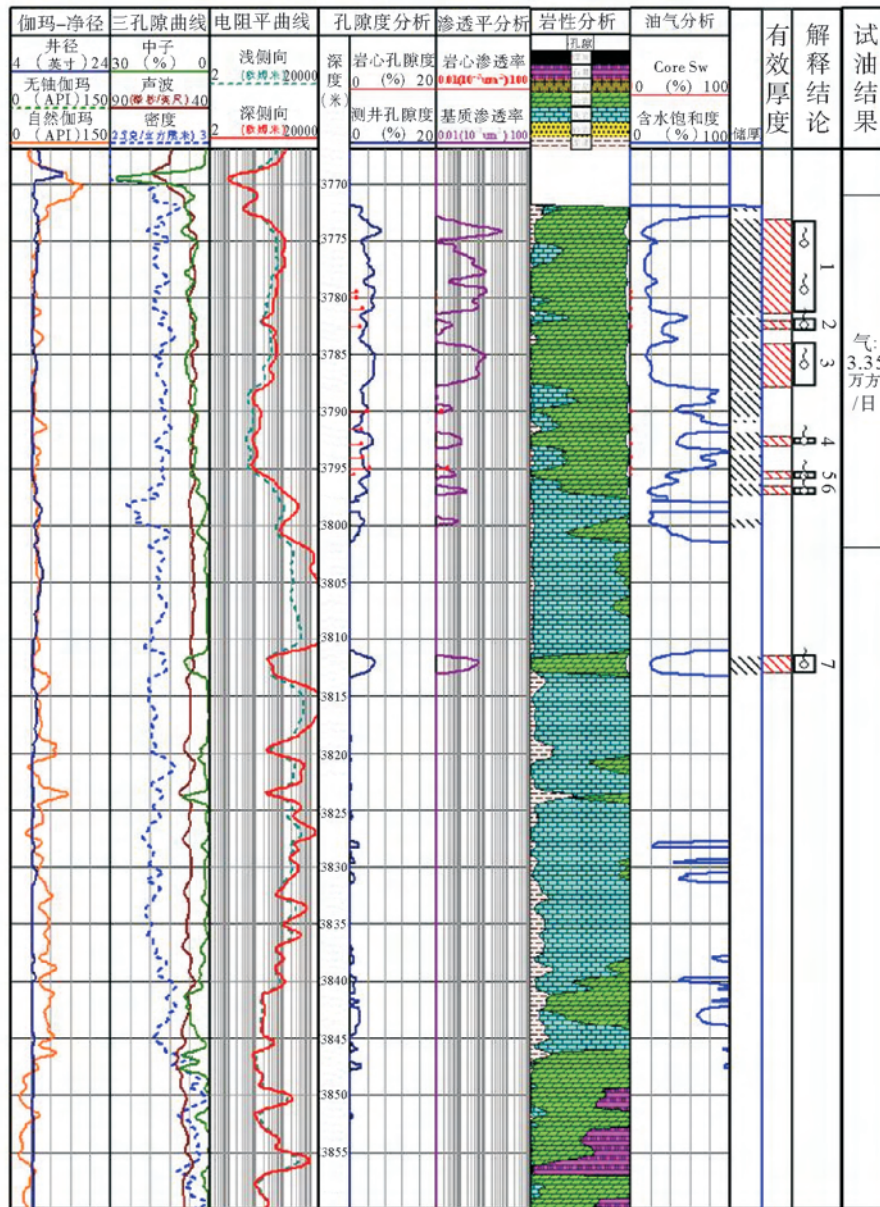


图 3 四川盆地雷口坡组第四段的白云岩和灰岩的测井曲线响应

Fig.3 Well logging response to dolomite and limestone of Triassic Leikoupo Group in Longgang area

表 1 基质弹性模量的理论值(据文献[34])

Table 1 Theoretical value of matrix modulus of elasticity (from reference [34])

弹性参数	白云岩基质	灰岩基质
$V_{pm} / (m/s)$	7340	6640
$V_{sm} / (m/s)$	3960	3440
$\rho_m / (g/cc)$	2.87	2.71
μ_m / Gpa	45	32
κ_m / Gpa	94.9	76.8

表 2 Wyllie 时间平均方程回归的基质弹性模量

Table 2 Matrix elastic modulus after Wyllie time average equation regression

弹性参数	白云岩基质	灰岩基质
$V_{pm} / (m/s)$	6885.3	6338.9
$V_{sm} / (m/s)$	3567.8	3204.9
$\rho_m / (g/cc)$	2.7888	2.6942
μ_m / Gpa	35.4992	27.1901
κ_m / Gpa	90.756	86.536

南黄海地震资料信噪比低的特点,为了获得高品质的反射信号,需要在 AVO 振幅反演之前对地震信

号进行保真去噪、残余动校正拉平和检波器径向补偿特殊处理,图5为对南黄海崂山隆起某条测

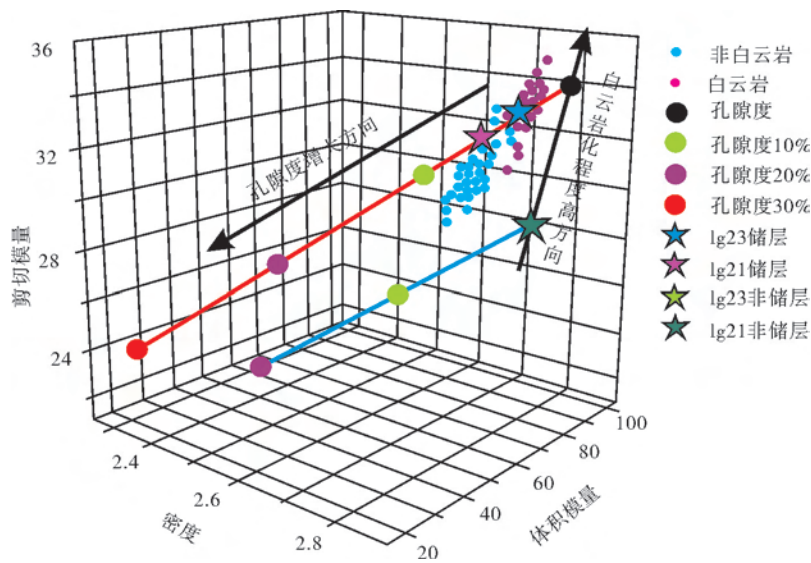


图4 四川盆地雷口坡组两口井的密度、体积模量和剪切模量参数的3D交互

Fig.4 3D interaction of density, bulk modulus and shear modulus of Leikoupo Group of two wells

线进行特殊处理前后的道集及成果剖面,可以看出,经过特殊处理后的地震道集(图5b)较好地衰减了残余多次波,噪音得到了压制,在一定程度上提高了资料信噪比,处理前后保幅性比较好。地震剖面深部信噪比得到了提高,波组特征比较清晰。

4.2 三参数反演结果

将原始地震道集的近角度、中角度和远角度分别代入公式(4),获得相对剪切模量体、相对体积模量体和相对密度体(数值有正负,代表相对量)。弹性模量是岩石在外力作用下发生的伸缩、剪切和体积特征的变化,其中剪切模量是剪切应力与应变的特征参数,反映了在外力的作用下,岩石外形发生剪

切位移,由于流体不存在剪切应力,一般剪切模量反映了岩石的骨架特征^[36],图6a中位于地层高点处相对剪切模量高,位于凹陷中心相对剪切模量为低值,处于断层两盘的相对剪切模量高,该时期主要为海西构造应力,地层由于遭受挤压应力,产生逆断层。体积模量为应力与弹性体的体变比,反映在外力作用下,岩石体积发生的变化,表明岩石的可压缩性。在油气指示中,体积模量通常是对孔隙流体比较敏感的参考指标^[36],图6b由于逆断层是后生沉积断层,位于凹陷中心处相对体积模量呈层性较厚,位于两边高点除了地层的压实作用,后期还受到挤压应力,因此,相对体积模量呈层性较密集。密度是与孔隙度、孔隙流体类型、饱和度和骨架矿物成分有

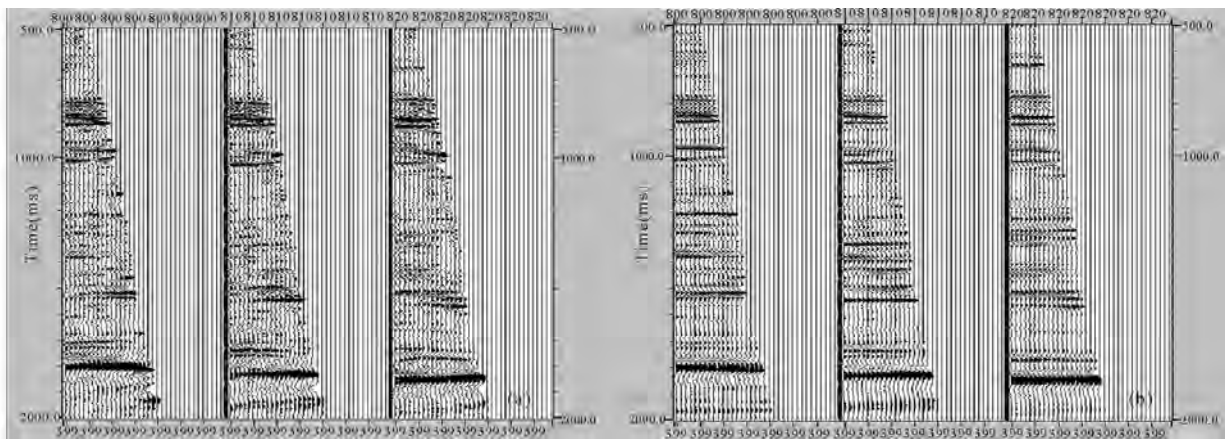


图5 共反射点道集特殊处理前后的对比图

a.原始共反射点道集;b.经过特殊处理后的共反射点道集

Fig.5 Common reflection point trace gathers before and after special processing

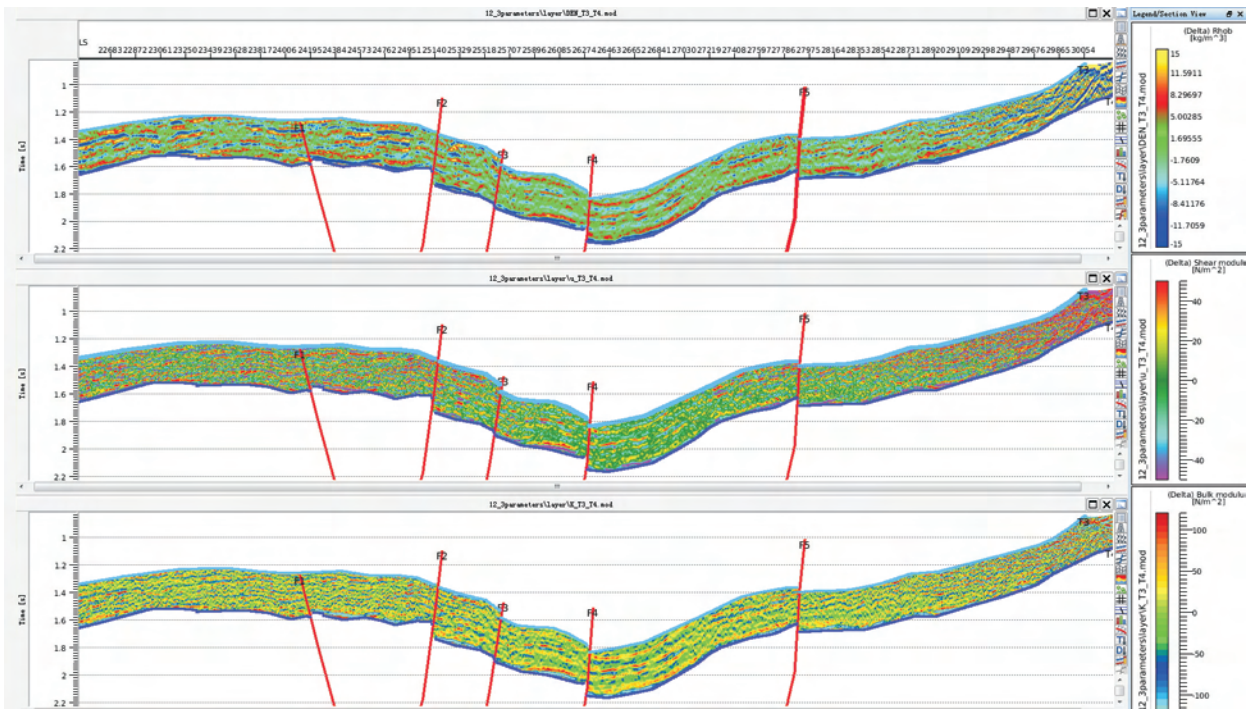


图 6 叠前三参数反演剖面

a.相对剪切模量剖面;b.相对体积模量剖面;c.相对密度剖面

Fig.6 Prestack three-term seismic inversion profile

关的参数,孔隙度一般取决于地层中骨架固体密度和孔隙流体密度,而孔隙度随密度增大而减小。饱和度与水和油的密度差值成正比,同时还受控于孔隙度,孔隙度越大,饱和度对密度的影响越大^[37],图6c位于两边高点密度存在负极大值,说明孔隙性发育较好。

4.3 地震相预测

分别从以上的相对剪切模量、相对体积模量和相对密度数据中提取下二叠统栖霞组-石炭系碳酸盐岩进行沿层属性提取,进行3D聚类分析(图7),根据相同的岩石基质具有的一定的线性关系,可以划分为同一种类型。从图中来看,目标储层存在多种基质,从聚类结果明显看出存在两个交叉,选择两个交叉的样本点所在的目标层进行地震属性分析,提取5类参数特征作为地震相标本,利用神经网络方法预测2个地震相,对所有岩层上大量不聚集的样本点进行分离,不聚集的部分作为地震相类型I,对于不属于类型I的样本点继续分离,确定地震相II、III和IV。

叠前三参数反演划分的地震相I、II、III和IV反投影到地震剖面上(图8),可以看出,得到的地震相有

横向分区特征,说明了受古构造等地质因素控制。地震相I类处于局限台地位置,位于高潮面和最大风暴潮汐面之间,绝大部分时间暴露于水上,受气候影响比较大,只有大潮和风暴潮期间才会被淹没,使得海水蒸发量大、盐度高、水流循环受限制、形成间歇性暴露的白云岩,在淡水淋滤作用下,易形成岩溶型储层。地震相II类位于低潮面以下的开阔台地沉积,海水循环较好,盐度基本与正常的浅海相当,水体能量低,主要为泥灰岩、含颗粒灰泥石灰岩,颗粒为原地堆积的正常海生物化石,岩石多呈灰色、深灰色,中厚层至块状,缺乏层理构造,在浅水区可能会发育生物礁和浅滩。地震相III处于向陆斜坡的台地边缘浅滩沉积相,沉积物为颗粒灰岩,颗粒为鲕粒、球粒或内碎屑,厚层至块状,交错层理、平行层理以及大型波痕构造发育,为水体浅、能量高的沉积环境,是形成浅滩的有利场所。地震相IV处于台地边缘发育的造礁生物岩,由于为台地的前缘,不断受到来自深海海域的海浪、洋流的冲击等作用,水体能量高,同时也是台地内部较温暖、盐度较高的海水与来自深海海域较冷、盐度正常、富含养分的海水混合的地方,因此,台地边缘是生物礁和浅滩发育的有利场所。

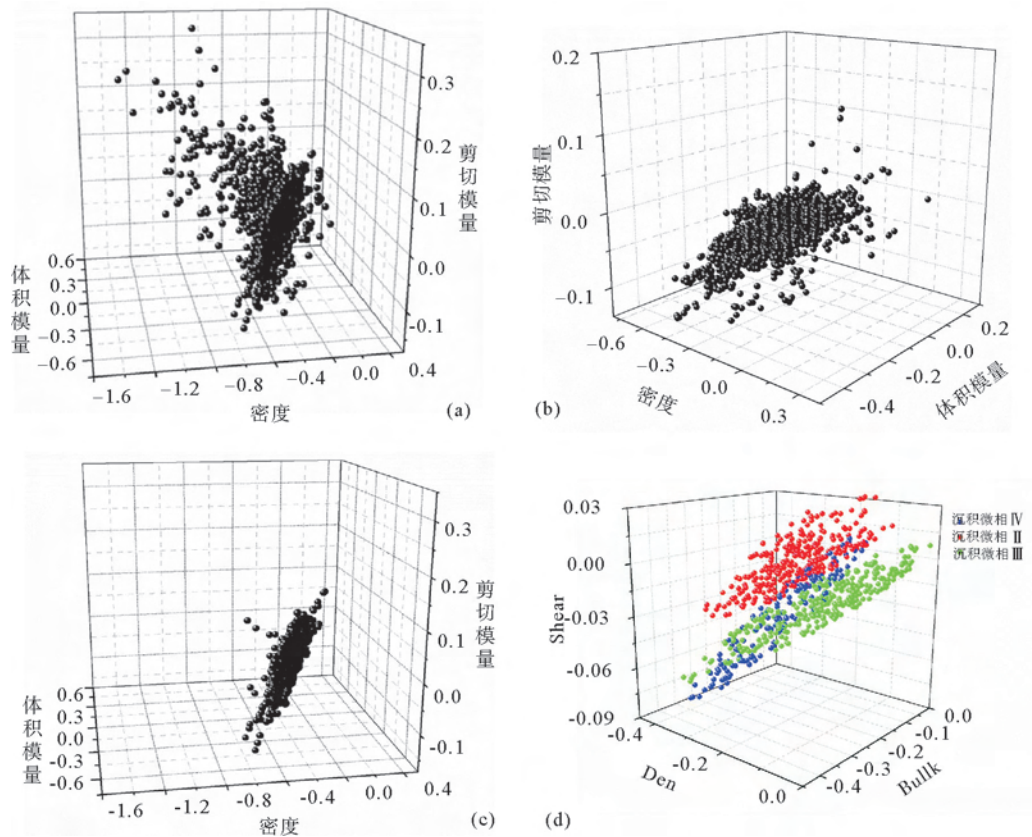


图7 3D聚类分析地震相划分

a.目标层所有样点;b.地震相类型I的样点;c.地震相类型为II、III和IV的样点;d.地震相II、III和IV的划分

Fig.7 3D interaction for seismic facies classification

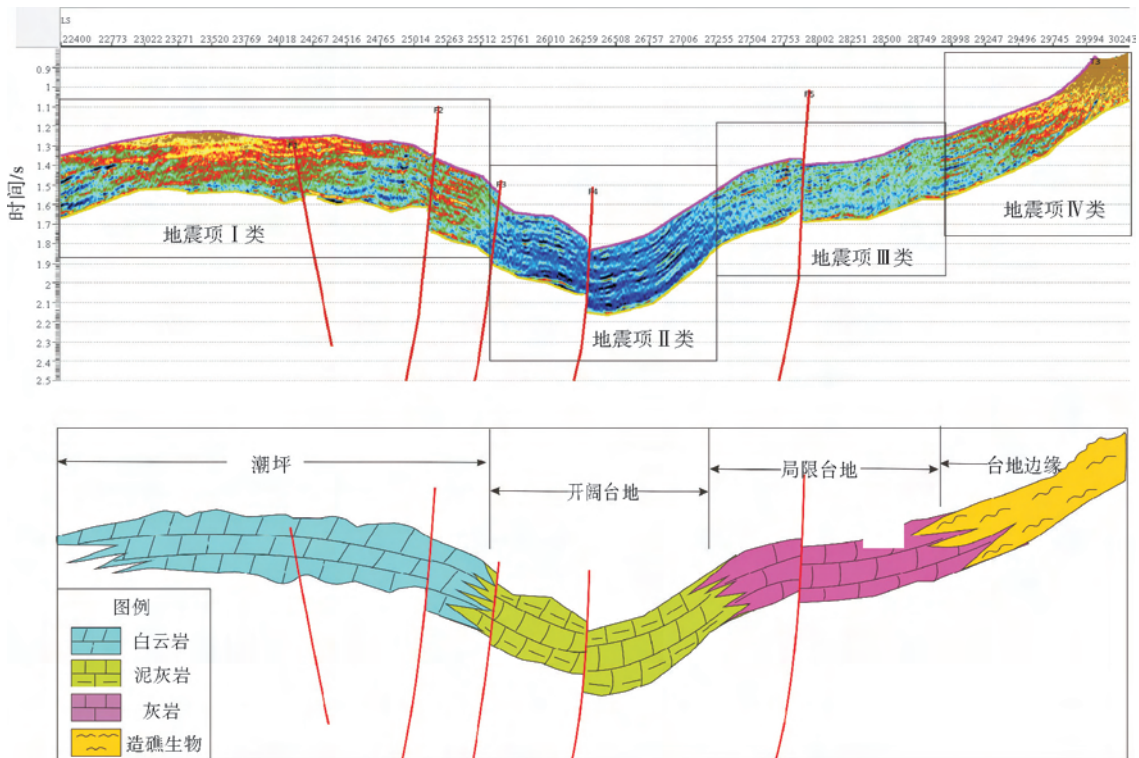


图8 下二叠统-石炭系碳酸盐岩叠前三参数反演划分的地震相以及建立的沉积相

a.叠前三参数反演划分的地震相;b.根据地震相建立的碳酸盐岩台地沉积相

Fig.8 Classification of seismic facies based on prestack 3 term seismic inversion for building sedimentary facies for Permian and Carboniferous carbonate in the South Yellow Sea basin

4.4 有效储层预测

根据有利储层测井和地震响应类比关系(图 4),碳酸盐岩随着孔隙度增大,剪切模量减小、体积模量减小,因此,有利储层样本位于空间的左下方。

分别对 I、II、III 和 IV 类地震相进行相对密度、剪切模量和体积模量进行 3D 交互(图 9),能够获得某种地震相下有利储层的样本点。

将有利储层投射到剖面(图 10)可以看出,地震相 I 类储层处于局限台地位置,时而露出水面,时而

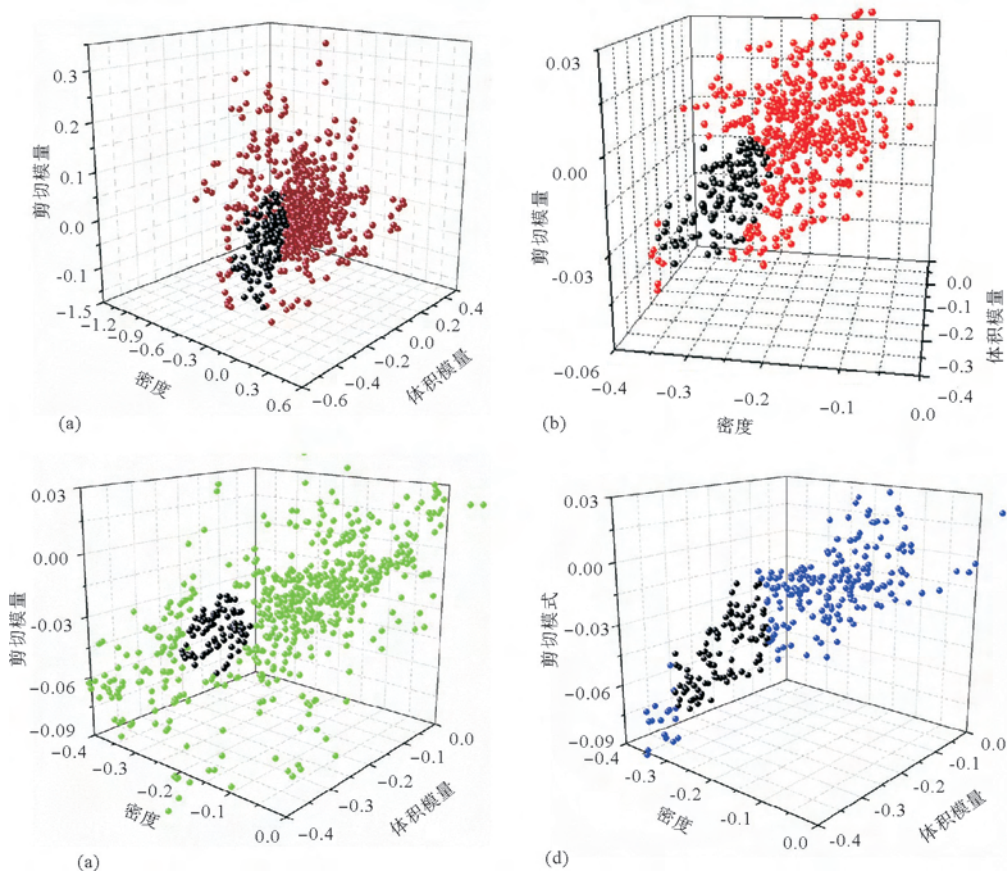


图 9 地震相控制下的 3D 交互有利储层样本点选择

a. I 型地震相的有利储层样本;b. II 型地震相的有利储层样本;c. III 型地震相的有利储层样本;d. IV 型地震相的有利储层样本

Fig.9 Favorable reservoir samples choose by 3D interactive of seismic facies

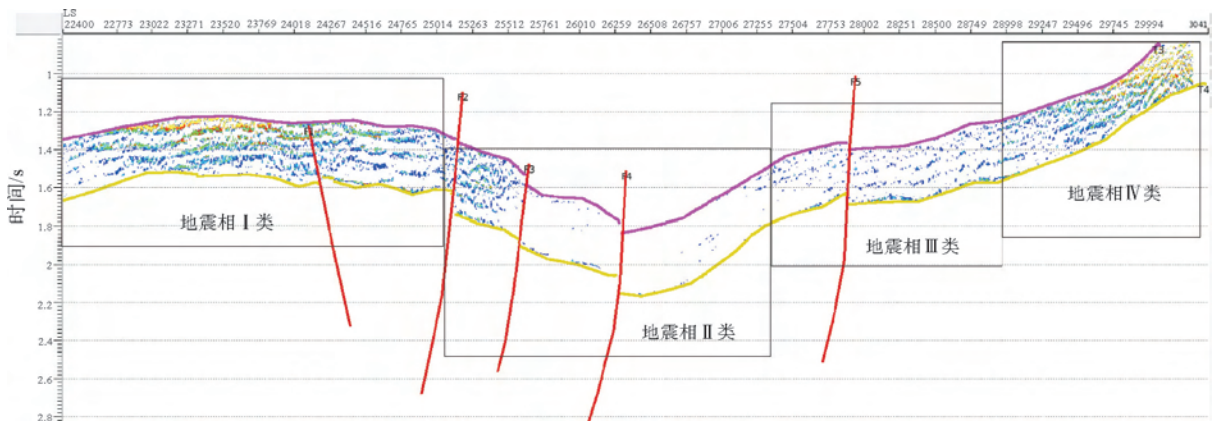


图 10 下二叠统-石炭系碳酸盐岩叠前三参数反演预测的有利储集层

Fig.10 According to Prestack three-term seismic inversion got the favorable reservoir prediction from Permian to Carboniferous strata carbonate in the south yellow sea basin

淹没在水下,孔隙呈层状发育,但越靠近不整合面孔隙越好,可能是由于在大气淡水或陆地淡水的淋滤作用下,海水与淡水混合形成岩溶型储层,形成较粗的白云石晶粒,晶间孔隙较发育;或者是由于受到蒸发作用往上提升交代碳酸盐岩沉积物形成的白云石储层,易形成准同生白云石和生物成因白云石。地震相 II 类储层由于处于开阔台地,以泥灰岩沉积为主的储层总体孔隙不太发育,但靠陆一侧的浅水区发育的白云化储层形成了一定的孔隙,可能为在泥灰岩沉积稳定期由于溶解再沉淀作用生成的微方解石之间的孔隙,Budd 认为微方解石和微孔隙并非是海水内矿物稳定作用的直接产物,而是在海水内经过两个阶段的作用,先是陆上暴露,然后又经过极浅的埋藏。地震相 III 类储层为发育台地边缘的浅滩,孔隙处于中等性质,由于受气候条件控制比较明显,水上和水下频繁交替,孔隙呈层状发育,原生粒间孔隙或颗粒被溶解而形成的内模孔隙。地震相 IV 类储层发育的台缘礁储层孔隙发育也较好,台缘礁顶部发育的孔隙成因分别为生长骨架孔隙、受溶解作用发育的孔隙和礁体露出水面受淡水淋滤而形成孔隙。

5 结论

(1) 针对南黄海盆地中-古生界海相碳酸盐岩勘探目的层,采用与其相似沉积演化的四川盆地的储集层进行类比,通过叠前三参数反演方法划分的地震相和有利储集层的物性,其反演精度较高,为进一步的储层识别提供更加准确、可靠的地层弹性参数。

(2) 由叠前三参数反演对南黄海下二叠统栖霞组和石炭系碳酸盐岩划分 4 类地震相,由海向陆方向分别为台地边缘生物礁相、台地边缘浅滩相、开阔台地相和古岩溶型的局限台地相,储层有礁、滩相储层,孔隙型储层和岩溶型的白云岩储层,其中岩溶型储层和生物礁储层孔隙发育最好,说明沉积环境对崂山隆起碳酸盐岩储层影响较大,但后期的构造运动对储层也有一定的改造作用。

参考文献 (References)

- [1] 张海敏, 陈建文, 李刚, 等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(3): 107-113. [ZHANG Haiqi, CHEN Jianwen, LI Gang, et al. Discovery from seismic survey in Laoshan uplift of the South Yellow Sea and the significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(3): 107-113.]
- [2] 李慧君, 林年添, 金兴, 等. 南黄海盆地崂山隆起中、古生界断裂特征[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6): 69-75. [LI Huijun, LIN Niantian, JIN Xing, et al. The fracturing characteristics of Mesozoic and Paleozoic Eras in Laoshan uplift of South Yellow Sea basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6): 69-75.]
- [3] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16. [LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part I): Distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1-16.]
- [4] 龚建明, 王建强, 李小豫, 等. 南黄海崂山隆起古生界页岩气远景区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(6): 115-120. [GONG Jianming, WANG Jianqiang, LI Xiaoyu, et al. Exploration targets of Paleozoic shale gas at the Laoshan uplift, South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(6): 115-120.]
- [5] 郭念发, 赵红格, 陈红, 等. 下扬子地区海相地层油气赋存条件分析及选区评价[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2002, 32(5): 526-530. [GUO Nianfa, ZHAO Hongge, CHEN Hong, et al. Oil-gas occurrence conditions and evaluation of chosen belts of the marine strata in Yangtze area[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2002, 32(5): 526-530.]
- [6] 李国玉. 海相沉积是中国 21 世油气勘探新的主战场[J]. 海相油气地质, 1998, 3(1): 1-5. [LI Guoyu. Marine sequence: A new and major objective of petroleum exploration in 21st century in China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1998, 3(1): 1-5.]
- [7] 罗志立. 中国南方碳酸盐岩油气勘探远景分析[J]. 勘探家, 1997, 2(4): 62-63. [LUO Zhili. Petroleum exploration potential analysis of carbonate rocks in the Southern part of China[J]. Petroleum Explorationist, 1997, 2(4): 62-63.]
- [8] 罗志立. 从华南板块构造演化探讨中国南方碳酸盐岩含油气远景[J]. 海相油气地质, 2000, 5(3-4): 1-19. [LUO Lizhi. Discussed the carbonate oil and gas prospect of china from the southern China plate tectonic evolution[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(3-4): 1-19.]
- [9] 夏日元, 唐建生, 邹胜章, 等. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 503-509. [XIA Riyuan, TANG Jiansheng, ZOU Shengzhang, et al. Palaeo-karst research of the carbonate oil-gas field and its application to oil-gas exploration and development[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27(5): 503-509.]
- [10] 杨华, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740. [YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos

- Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 733-740.]
- [11] 孙玮, 刘树根, 徐国盛, 等. 四川盆地深层海相碳酸盐岩气藏成藏模式[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2349-2361. [SUN Wei, LIU Shugen, XU Guosheng, et al. Formation models of marine carbonate natural gas pools in the deep part of the Sichuan basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2349-2361.]
- [12] 金之钧, 庞雄奇, 吕修祥. 中国海相碳酸盐岩油气勘探[J]. *勘探家*, 1998, 3(4): 66-68. [JIN Zhijun, PANG Xiongqi, LV Xiuxiang. Petroleum exploration in marine carbonates in China[J]. *Petroleum Explorationist*, 1998, 3(4): 66-68.]
- [13] 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 中国海相碳酸盐岩大气田成藏特征与模式[J]. *石油学报*, 2013, 34(S1): 29-40. [XIE Zengye, WEI Guoqi, LI Jian, et al. Reservoir characteristics and accumulation modes of large carbonate gas fields in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S1): 29-40.]
- [14] 闫伟鹏, 杨涛, 李欣, 等. 中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(4): 11-17. [YAN Weipeng, YANG Tao, LI Xin, et al. Geological characteristics and hydrocarbon exploration potential of lacustrine carbonate rock in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(4): 11-17.]
- [15] 陈勇, 陈洪德, 关达, 等. 地震技术在碳酸盐岩生物礁油气储层流体识别中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(21): 6208-6215. [CHEN Yong, CHEN Hongde, GUAN Da, et al. The application of seismic technology in fluid discrimination of carbonation reef oil and gas reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(21): 6208-6215.]
- [16] 谷明峰, 徐美茹, 周进高, 等. 叠前同时反演技术在碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(2): 60-64. [GU Mingfeng, XU Meiru, ZHOU Jingao, et al. Application of prestack simultaneous inversion to the prediction of carbonate reservoirs[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(2): 60-64.]
- [17] 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.]
- [18] 姚永坚, 冯志强, 郝天珧, 等. 对南黄海盆地构造层特征及含油气性的新认识[J]. *地学前缘*, 2008, 15(6): 232-240. [YAO Yongjian, FENG Zhiqiang, HAO Tianyao, et al. A new understanding of the structural layers in the South Yellow Sea basin and their hydrocarbon-bearing characteristics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 232v240.]
- [19] 邢涛, 张训华, 张向宇. 南黄海磁性基底特征分析和综合解释[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(5): 946-953. [XING Tao, ZHANG Xunhua, ZHANG Xiangyu. Magnetic basement and structure of the Southern Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(5): 946-953.]
- [20] 祁江豪, 张训华, 吴志强, 等. 南黄海 Obs 2013 海陆联合深地震探测初步成果[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(2): 76-84. [QI Jianghao, ZHANG Xunhua, WU Zhiqiang, et al. Preliminary results of the South Yellow Sea OBS 2013 onshore-offshore joint deep seismic survey[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(2): 76-84.]
- [21] 吴志强, 温珍河. 南黄海前古近系油气地震勘探策略[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(6): 20-24. [WU Zhiqiang, WEN Zhenhe. Strategy of seismic exploration for pre-tertiary oil and gas in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(6): 20-24.]
- [22] 刘俊, 吴淑玉, 施剑, 等. 南黄海崂山隆起地震采集方法[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(10): 24-29. [LIU Jun, WU Shuyu, SHI Jian, et al. On seismic acquisition methods on the Laoshan uplift of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(10): 24-29.]
- [23] 陈建文, 张异彪, 刘俊, 等. 南黄海“高富强”地震勘查技术及其应用[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(10): 9-17. [CHEN Jianwen, ZHANG Yibiao, LIU Jun, et al. The "HRS" seismic exploration technology and its application in the South Yellow Sea basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(10): 9-17.]
- [24] 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.]
- [25] 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.]
- [26] 刘树根, 汪华, 孙玮, 等. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 781-792, 818. [LIU Shugen, WANG Hua, SUN Wei, et al. Analysis on special features of petroleum geological conditions of marine facies in Sichuan basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 781-792, 818.]
- [27] 张水昌, 朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2006, 27(5): 1-8. [ZHANG Shuichang, ZHU Guangyou. Gas accumulation characteristics and exploration potential of marine sediments in Sichuan basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(5): 1-8.]
- [28] 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 9-14, 21. [MA Yongsheng. Generation mechanism of Puguang gas field in Sichuan basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 9-14, 21.]
- [29] 祁江豪, 温珍河, 张训华, 等. 南黄海地区与上扬子地区海相中—古生界岩性地层对比[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 109-119. [QI Jianghao, WEN Zhenhe, ZHANG Xunhua, et al. Lithostratigraphic correlation of Mesozoic and Palaeozoic marine strata between South Yellow Sea and upper Yangtze region[J]. *Marine Geology & Quater-*

- nary Geology, 2013, 33(1): 109-119.]
- [30] 贾承造, 李本亮, 张兴阳, 等. 中国海相盆地的形成与演化[J]. 科学通报, 2007, 52(S1): 1-8. [JIA Chengzao, LI Benliang, ZHANG Xingyang, et al. Formation and evolution of the Chinese marine basins [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 1-11.]
- [31] 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.]
- [32] 黄东, 张健, 杨光, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层划分探讨[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 89-95. [HUANG Dong, ZHANG Jian, YANG Guang, et al. The discussion of stratum division and stratum for the Leikoupo formation of middle Triassic in Sichuan basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 89-95.]
- [33] 杨光, 石学文, 黄东, 等. 四川盆地龙岗气田雷四³亚段风化壳气藏特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 17-24. [YANG Guang, SHI Xuewen, HUANG Dong, et al. Characteristics and major controls of weathering crust gas reservoirs in T₂/L₄ in the Longgang Gas Field, Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(9): 17-24.]
- [34] 葛瑞·马沃可, 塔潘·木克基, 杰克·德沃金. 岩石物理手册[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2008. [MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The Rock Physics Handbook [M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2008.]
- [35] 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.]
- [36] 郝前勇, 印兴耀, 王玉梅, 等. 弹性模量流体因子在永新工区储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(5): 502-507. [HAO Qianyong, YIN Xingyao, WANG Yumei, et al. Application of elastic modulus fluid factor on reservoir prediction at Yongxin block[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(5): 502-507.]
- [37] 石玉梅, 姚逢昌, 孙虎生, 等. 地震密度反演及地层孔隙度估计[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 197-204. [SHI Yumei, YAO Fengchang, SUN Husheng, et al. Density inversion and porosity estimation using seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 197-204.]