

地震测井联合反演技术在南黄海盆地北部坳陷中生代储层预测中的应用

朱凌霄¹, 吴志强^{2,3*}, 祁江豪^{2,3}

(1 美国博林格林州立大学, 俄亥俄州博林格林 43402; 2 自然资源部海洋环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 3 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 266061)

摘要:在构造复杂和测井资料少的海域, 有效地进行地震反演和储层预测是油气前景评价的关键。针对南黄海盆地白垩系砂岩储层中岩性复杂和物性高度非均质的问题, 采用了测井、地震资料联合的稀疏脉冲约束反演方法和构造形态约束下的低频模型构建技术, 对二维多道地震数据进行了目标层波阻抗反演处理, 并对白垩系砂岩储层的横向分布进行了追踪预测。结果表明: 地震波阻抗剖面能够刻画储层的空间展布特征, 表征储层内部物性变化, 预测有利储层分布范围; 储层预测认为白垩系泰州组发育多层低波阻抗的泥岩生烃层, 中间夹两层波阻抗较高的砂层, 与钻井资料对比为物性较好的油气储集层。

关键词:砂岩储层; 储层预测; 稀疏脉冲反演; 北部坳陷

中图分类号: P631.8⁺15; TE122

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.06009

在区域大地构造背景上, 南黄海盆地位于下扬子块体的主体部位, 是奠基于变质岩系和中—古生代海相残留盆地双重基底之上的中—新生代大型陆内断陷—坳陷盆地, 自北向南依次划分为“三隆两坳”共 5 个构造单元, 即千里岩隆起、北部坳陷、中部隆起、南部坳陷和勿南沙隆起^[1]。

南黄海盆地的油气资源勘探始于 20 世纪 60 年代, 主要勘探目标层为中、新生代陆相沉积层,

进行了大量的多道地震调查工作, 并针对古近系、白垩系储层进行了钻探, 在古近系和白垩系见到了油气显示, 未获得油气商业突破^[2]。大量的研究认为, 南黄海盆地北部坳陷的白垩系分布广、厚度大, 砂岩地层是主要油气储层, 具有较好的油气勘探前景^[3,4]。

地震反演处理与属性分析是研究储层与生烃层的有效方法, 曹强等^[5]首次应用地震属性分析方法对东北凹陷上白垩统泰州组和古新统阜宁组主力烃源岩的厚度进行了初步预测, 并结合地震速度岩性分析法预测了本区泰州组烃源岩的厚度, 李维新等^[6]针对南黄海陆相复杂隐蔽岩性储层的岩性和物性高度非均质的勘探实际, 提出了基于非线性统计地震褶积模型和非线性储层岩性物性统计褶积模型的联合反演技术, 实现了确定性反演、统计性反演和非线性理论三者的有机结合, 对北部坳陷诸城 A 构造的地震测线进行了波阻抗反演, 获得了古近系分辨率高、砂泥岩层次分

收稿日期: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(41210005, 41606083); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划(2015ASKJ03); 国家海洋地质专项(DD20160147)

作者简介: 朱凌霄(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地球物理和构造地质等方面的研究工作. E-mail: skywalker_2009@live.cn

*** 通讯作者:** 吴志强(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地球物理和构造地质等方面的研究. E-mail: wuzq_1964@163.com

明、横向变化清晰,反映了实际的陆相沉积环境的反演剖面,但未对白垩系砂岩储层进行反演处理;李旭彤等^[7]以多道反射地震剖面和钻井资料为基础,采用合成地震记录和地震属性分析的方法,开展了南黄海盆地北部坳陷白垩系地层沉积及油气地质特征的研究,得出了坳陷内白垩系保存较完整、厚度较稳定,泰州组为良好的烃源岩,赤山组下部和浦口组为良好的储集层等结论。从以上的研究实践可以看出,虽然进行了大量的研究工作,但是对白垩系砂岩储层的地震反演预测处理与研究较少,还没有形成针对性的地震反演与预测技术方法。

本文基于南黄海盆地北部现有坳陷的钻井测井资料和新获得的二维多道地震数据,以测井资料为约束条件,以地震解释的层位和构造形态作为低频控制模型,采用最大似然反褶积求得一个具有稀疏特性的反射系数序列并反演得到宽带波阻抗的方法,进行了波阻抗反演处理,对处理的结果结合钻井资料和油气地质特征开展了综合研究,分析了中生代砂岩储层的特征。

1 地震地质条件

1.1 地质条件

南黄海盆地北部坳陷北以千里岩隆起区为界、南至中部隆起,自北至南划分为东北凹陷、北部凹陷、北部凸起、中部凹陷、西部凹陷和南部凹陷等6个次级单元,且凹陷与凸起相间分布,构造走向为NEE。北部坳陷自白垩世开始发育^[8-10],接受了中、新生代的河流湖泊相沉积建造,已有钻井和二维多道地震揭示,中、新生界沉积厚度较大,自下而上依次为白垩系葛村组(K_{1g})、浦口组(K_{2p})、赤山组(K_{2c})和泰州组(K_{2t}),古近系古新统阜宁组(E_{1f})、始新统戴南组(E_{2d})和三垛组(E_{2s}),新近系盐城组(N_{1y})及第四系东台组(Q_d),总厚度为3 000~7 000 m。其中,白垩系在北部坳陷的分布比较广泛,除在凸起部位缺失外,其他区域均有分布,厚度在1 000 m以上,最厚部位达4 000 m以上^[3]。白垩系上统(相当于泰州组)以黑色泥岩为主,在盆地西部分布比较稳定。白垩系下统的葛村组和中统的浦口组、赤山组以及上统泰州

组地层,为湖泊—河流—湖泊相沉积旋回^[4]。

最新的地震资料、钻井揭示表明,白垩系及上覆的古近系发育数套较厚的砂岩和泥岩,可作为油气储层和盖层。沉积相研究也表明,坳陷内巨厚的白垩系中赋存数套烃源岩,加之中、新生界数套物性较好的储、盖层良好匹配的构造圈闭,使白垩系成为南黄海盆地找油的首选对象,是本区油气勘探突破的主要目的层之一^[11-13]。

1.2 地层物性特征

根据测井资料分析,北部坳陷白垩系砂岩和泥岩具有不同的速度特征,泥岩的速度在3 200~4 200 m/s之间,砂岩的速度在4 100~5 340 m/s之间,整体表现为砂岩波阻抗高、泥岩波阻抗低的特征。同时,随孔隙度的增加,砂岩速度与波阻抗呈下降趋势。上覆的古近系砂岩和泥岩的速度均低于白垩系^[14-18]。

在地震剖面上,白垩系主要表现为一套中—强振幅、中—低频率、较连续—连续反射特征,局部呈断续反射。从地震反射特征及结构上可划分为上、中、下白垩统3个地震层序^[18]。

下白垩统地震层序表现为底部上超、顶部局部削截—整一接触关系。主要为平行反射结构、较高连续性,较强振幅密集反射,似席状外形,平行、亚平行内部反射结构。中白垩统地震层序为局部上超,顶为整一接触,主要反射特征与下白垩统地震层序基本类似。上白垩统地震层序为平行反射结构,连续性较差,中等振幅、反射稀疏反射,说明沉积岩性较为均一,结合钻遇地层岩性分析认为,这一地质时期水域较深,水动力较弱,为半深湖相沉积^[18]。

2 反演方法流程

地震反演是以已知区域地质规律为指导,综合利用地震资料横向高分辨率和测井资料纵向高分辨率的优势,对地下岩层空间结构和物理性质进行计算求解的过程。众所周知,测井可以较准确地描述井孔处某一层段的岩性特征及含油气信息,但却无法描述井间以及井孔周围的储层、油气赋存状况;地震资料虽然在一定程度上反映了储层物性信息,在横向上具有测井资料无可比拟的

连续性,但由于地震波分辨率的限制,难以像测井资料那样细致地描述纵向分布特征。通过先进的反演技术对地震资料进行岩性圈闭识别和物性预测,是目前行之有效的单一手段之一^[19]。

目前,常用的测井数据约束下的宽带反演方法有广义线性反演、稀疏脉冲反演和模拟退火反演^[20]。其中,广义线性反演采用最小二乘法反褶积,通过广义逆矩阵建立阻抗的递推公式来求解波阻抗,其具有较高的纵向分辨率,但抗噪能力差,对信噪比较低的地震数据反演精度较低。稀疏脉冲反演采用最大似然反褶积、结合波阻抗趋势计算初始的波阻抗,再通过目标优化函数进行迭代修正,其具有适应地质条件广、抗噪能力强的优点,缺点是对基础资料的要求高,对具有复杂地层产状和断裂发育的地区反演精度较低。模拟退火反演采用最大后验概率准则,以模拟退火算法并通过目标函数优化得到反演结果,优点是信噪比高,适应复杂地层结构,缺点是反演精度低。

由于北部坳陷的白垩系砂岩储层处于坳陷的中心部位,目标层段的分布较稳定,断裂相对较少、构造起伏相对平缓,沉积特征比较明显,声波测井曲线相关性较好,说明井点处目标层段的波阻抗以及声波速度,在其所处位置的相邻区域具有代表性,虽然探井的密度较为稀疏,从地质统计学的角度来讲,可以用于对地震资料的约束反演。根据北部坳陷白垩系泥岩与砂岩互层中单层厚度较薄,地震资料的主频较低,地层起伏相对平缓等特点,经试验选用 Jason 约束稀疏脉冲波阻抗反演方法。该方法是基于道的反演,其实质就是在阻抗趋势的约束下,用最少数目的反射系数脉冲达到合成记录与地震道的最佳匹配,其最大的特色就是在于约束。其是以测井声波阻抗为骨架,以基于地震层位解释构建的地质模型为约束,从探井出发,对沿测线的波阻抗的动态变化范围进行横向内插外推,从而确定出各个待反演地震道各采样点上的波阻抗动态范围,也就是说,应用该方法反演的波阻抗值应不超出此动态变化范围。所以,不同的约束条件会产生不同的反演结果,约束条件给定的越合理,反演的结果也就越可靠。该软件在波阻抗动态范围的确定过程中,可进行人工的干预,从而实现应用各种地质先验信息来控制反演结果、减少多解性的目的^[21]。另外,约

束稀疏脉冲反演在低频信息的处理上提供了多种的选择。这其中包括应用速度谱资料以及从声波测井曲线中提取的低频信息作为对地震资料中所缺失的低频速度信息的补偿。

图 1 为 Jason 约束稀疏脉冲波阻抗反演流程图,首先对测井资料进行标准化处理,再结合地震数据进行子波提取、合成地震记录制作等工作;然后,进行地震层位的对比标定、解释,初始模型的建立,地震数据的反演,以及对反演结果的效果分析。如反演结果满足实际要求的精度,可作为正式结果应用。下面简要介绍关键的工作步骤。

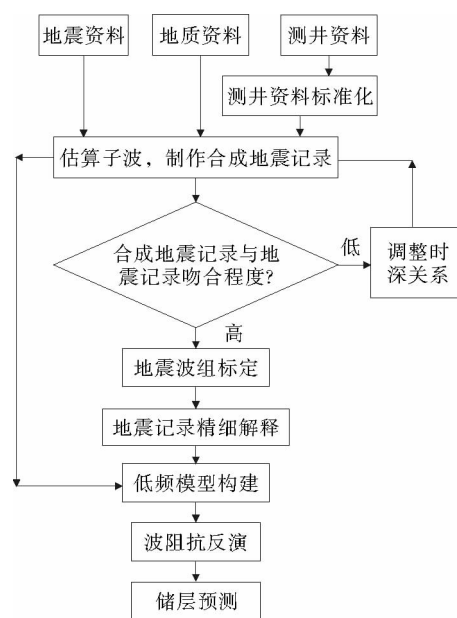


图 1 宽度约束反演流程图

Fig. 1 Flow chart of width constrained inversion

(1) 测井数据标准化

由于测井资料是在不同的时间和钻井环境下测量的,存在随机误差和系统误差^[22]。因此,必须对测井资料进行标准化处理,以防止由于这些因素造成的反演误差。测井资料主要包括环境校正和标准化处理,其中标准化处理是刻度的标准化,其过程就是选择分布稳定的岩性,根据其具有相同沉积环境,岩性、电性大致相同,测井响应是相似的特点,以此作为标准层段进行测井资料的标准化处理。

(2) 子波提取与层位标定

子波提取是反演的关键步骤^[23],首先利用地震和测井资料提取子波的振幅谱和相位谱,再合

成一个理论的雷克子波,用该子波与测井数据合成的地震记录进行层位标定,再根据标定结果修改时间—深度关系并提取新的子波(图2),如此

反复迭代,并同时调整地震子波的有效长度,直至得到与井旁道相关性良好的合成记录,使之更符合不同深度段的不同频率的地震反射数据(图3)。

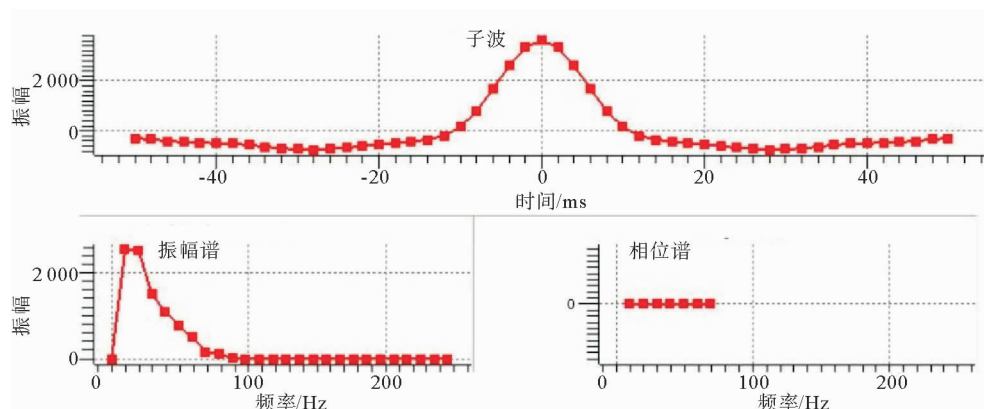


图2 提取的子波振幅、相位谱和合成的理论 Ricker 子波

Fig. 2 Amplitude and phase spectrum of extracted wavelet and theoretical Ricker wavelet created

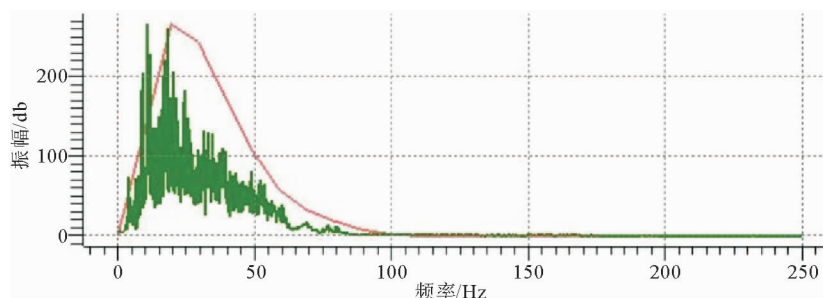


图3 子波频谱(红线)与实际地震记录频谱(绿线)对比

Fig. 3 Comparison of created wavelet frequency spectrum (red line) and real seismic record frequency spectrum (green line)

在这一步骤中,合成地震记录层位标定是其中最重要的过程之一,其标定精度直接决定子波提取的效果和最终的反演结果精度。本文采用的标定方法是对比合成地震记录和实测地震记录中的强反射界面,如果时间不吻合,则调整合成记录的时深关系,直至两者吻合为止。

(3) 建立准确的地质模型

由于 Jason 的反演是基于模型的反演,因此首先要根据地震资料解释主要目的层地层内速度的变化情况,建立正确的地质先验模型和反演速度趋势模型。地震层位对比、追踪解释得到的构造层位和断层,是反演处理中构建地质模型的基础,也是地震反演处理过程中加入地质背景和地质约束条件的重要依据。通过地震资料解释提供的构造起伏背景和断层信息,来指导声波测井数

据的内插与外推,建立用于反演处理的低频初始模型,用于约束地震有效频带的地质模型向正确的方向收敛。因此,地震层位解释的精度将直接影响反演结果的精度。约束地震反演处理要求地震层位、断层的解释应精细准确,标定与解释的层位要尽可能靠近反演目标层,层位的接触关系要清晰准确。另外,由于声波测井数据的纵向分辨率非常高,常规解释的地震层位在纵向上较稀疏,这样就不能较好地约束测井曲线的横向变化趋势。因此,按照测井曲线的低频变化趋势在反演目标层段合理的增加一些控制层位,对提高反演精度非常有益^[24]。

(4) 波阻抗约束反演

在以上工作的基础上开始波阻抗约束反演,在 Jason 反演软件中,全频带的绝对波阻抗反演

是由 Invertrace 模块中的约束稀疏脉冲反演与道合并共同完成的。该方法计算的特点是,反射系数的稀疏程度与合成记录和原始地震道残差的高低是相互矛盾的,这是由于稀疏脉冲反演遵循了最小目标函数的原则,以数据闭合差权因子 λ 值对反演运算的精度和速度起调解作用, λ 值越小运算速度越快,但分辨率越低, λ 值越大,运算速度越慢,但分辨率越高。因此在反演中,很重要的一步工作就是寻找一个合适的值,使之满足合成地震记录数据,使残差数据的信噪比最大,通过计算得到的波阻抗数据与井的波阻抗相关系数最高,目标函数中反射率不匹配最大而地震不匹配最小,使反演剖面既保持细节又不损失低频背景。

3 反演结果分析

图 4 为反演所用的地震数据剖面图,图 5 为波阻抗反演的结果。结合测井资料可以看出,预

测的井间的砂层关系较为清楚。上白垩统泰州组有明显的数层低波阻抗层,并从 B 井左侧一直延伸到 CDP:29000 附近,认为是较好的泥岩生烃层,中间夹有两层波阻抗较高的砂层,与钻井资料对比为较好的储层。从钻井揭示和沉积相分析来看,泰州组上段、阜宁组三四段和戴南组均系区域盖层^[11],从地震反射剖面的构造解释结果来看,CDP:31600 至 B 井位置一带存在断层交错,可能发育断层油气藏,也可能有沿断层冒溢的情况。从历史钻探结果看,泰州组一段泥岩已见油气显示,亦不排除沿断层运移至其上的阜宁组一、二段的情况,表明本区白垩系泰州组—古近系阜宁组下生上储组合,即泰州组泥岩作为生烃源岩,过断裂或不整合地层接触界面作为油气运移通道,垂向或侧向运移至阜宁组砂岩储层中,形成岩性油气藏,与李旭彤等^[7]采用地震属性分析分析方法预测的结果基本一致。CDP:31000~32500 段为波阻抗值高的白垩系致密砂岩,覆盖在海相碳酸

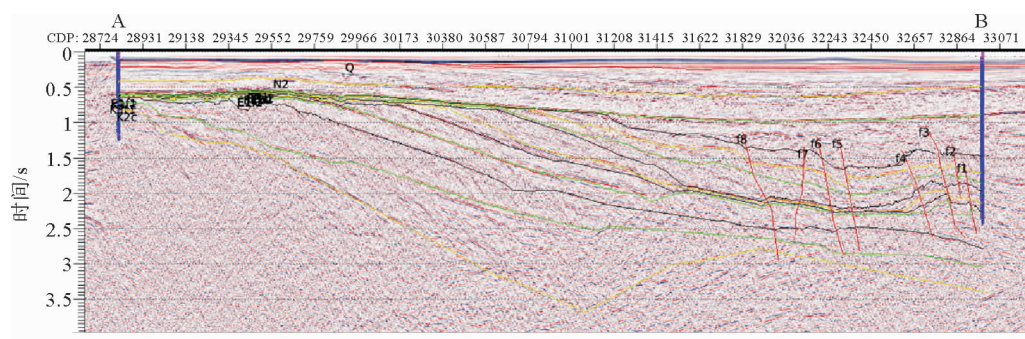


图 4 反演使用的地震数据剖面图和层位/断层解释结果

Fig. 4 The seismic profile and layer/fault interpretation used for inversion

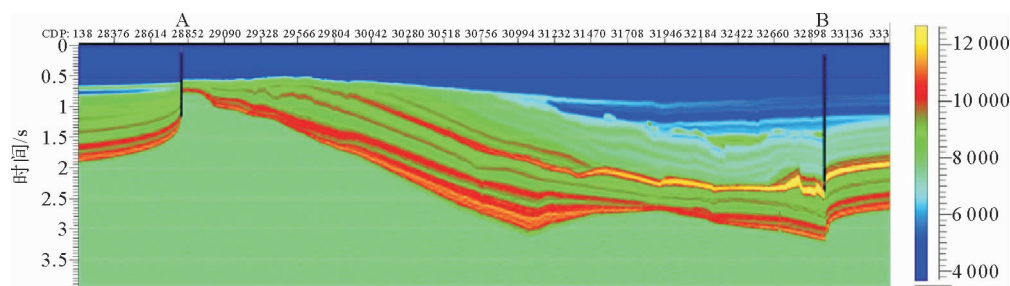


图 5 波阻抗反演的结果

Fig. 5 Result of wave impedance inversion

盐岩古潜山之上,且其上为区域性的泥岩盖层,其下为厚度较大的海相沉积层,具有较大的生烃潜力^[25],推测在该区域可能形成古潜山型的油气藏。

4 结论和建议

应用 Jason 对南黄海盆地北部坳陷地震测线的储层进行预测,反演结果与地质沉积特征较吻合,明确了井间砂体之间的分布关系。说明 Jason 反演软件在储层预测中有着重要的作用。从反演剖面上可以看到,该测线靠近 B 井一端的复杂断层区域内有存在断层油气藏的较大可能性,更靠近 A 井一带的地层中则可能性较小。说明该区存在构造控制下的岩性圈闭油气藏类型的可能性较大,且油气藏与其附近是否存在厚度较大的泥质烃源岩关系密切。因此,在南黄海北部坳陷中生代陆相油气勘探中,应注意研究储层与烃源岩的组合特征,寻找近烃源岩的砂岩储集层。

宽带约束稀疏脉冲反演在该条测线上取得了较好的效果。然而,前提是高质量的地震和测井资料,数据处理中每一步的质量控制和合理的地质构造解释,对反演处理精度都非常重要。因此,做好地震资料的振幅保持处理和偏移成像处理及测井资料进行标准化处理是基础,同时还必须结合地质构造背景和目标层物性变化规律,做好低频模型的构建,才能取得良好的反演效果。

参考文献:

- [1] 沿海大陆架及毗邻海域油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志卷十六沿海大陆架及邻海域油气区(上)[M]. 北京:石油工业出版社,1990.
- [2] 戴春山,李刚,蔡峰,等. 黄海海域前第三系及油气勘探方向[J]. 中国海上油气(地质),2003,17(4):225-231.
- [3] 李培廉. 南黄海的白垩系——一个值得重视的找油领域[J]. 海洋地质与第四纪地质,1986,6(4):49-53. doi:10.16562/j.cnki.0256-1492.1986.04.006
- [4] 曲希玉,刘立,陈建文,等. 南黄海盆地北部坳陷白垩系沉积特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2005,35(4):443-448.
- [5] 曹强,叶加仁,石万忠. 地震属性法在南黄海北部盆地勘探新区烃源岩厚度预测中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(5):109-114.
- [6] 李维新,秦楠,吴媚,等. 岩性-物性高分辨率非线性联合反演技术及其应用[J]. 石油物探,2009,48(3):359-367.
- [7] 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. doi:10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.06.012
- [8] 高顺莉,徐曦,周祖翼. 南黄海北部盆地晚白垩世以来构造变形与盆地成因[J]. 石油与天然气地质,2015,36(6):924-933.
- [9] 侯方辉,张志珣,张训华,等. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(5):61-68.
- [10] 张训华,等. 中国海域构造地质学[M]. 北京:海洋出版社,2008.
- [11] 李刚,陈建文,肖国林,等. 黄海海域陆相中生界油气远景[J]. 海洋地质动态,2003,19(8):7-11.
- [12] 姚伯初. 黄海海域地质构造特征及其油气资源潜力[J]. 海洋地质及第四纪地质,2006,26(2):85-93. doi:10.16562/j.cnki.0256-1492.2006.02.013
- [13] 蔡乾忠. 中国海域及邻区主要含油气盆地与成藏地质条件[J]. 海洋地质及第四纪地质,1998,18(4):1-10.
- [14] 吴志强,肖国林,林年添,等. 基于南黄海区域地质调查的地震关键技术和成果[J]. 海洋地质与第四纪地质,2014,34(6):119-126.
- [15] 吴志强,陆凯,施剑. 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.
- [16] 吴志强. 黄海地层岩石物理特征及其对地震勘探技术的挑战[J]. 中国海上油气(地质),2003,17(6):407-411.
- [17] 吴志强,施剑,童思友,等. 南黄海沉积层地震反射特征模拟分析与勘探技术选择的思考[J]. 海洋地质动态,2010,26(12):14-18.
- [18] 吴志强,陆凯,施剑. 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.
- [19] 李庆忠. 论地震约束反演的策略[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(4):423-438.
- [20] 张永刚. 地震波阻抗反演技术的现状和发展[J]. 石油物探,2002,41(4):385-390.
- [21] 郝银全,潘懋,李忠权. Jason 多井约束反演技术在油气储层预测中的应用[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(3):297-300.
- [22] 张广智,刘洪,印兴耀,等. 地震解释中声波测井资料的整理方法研究[J]. 地球物理学进展,2011,26(6):2055-2063.
- [23] 梁光河. 测井约束反演子波外推方法研究[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(3):296-304.
- [24] 张超英,周小鹰,董宁. 测井约束的地震反演在鄂尔多斯盆地大牛地气田中的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):909-917.
- [25] 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.

APPLICATION OF SEISMIC-LOG JOINT INVERSION TO PREDICTION OF MESOZOIC SANDSTONE RESERVOIR IN NORTH DEPRESSION OF SOUTH YELLOW SEA BASIN

ZHU Lingxiao¹, WU Zhiqiang^{2,3*}, Qi Jianghao^{2,3}

(1 Bowling Green State University, Bowling Green 43402, Ohio, USA; 2 Key Laboratory of Marine

Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In the exploration areas with complicated tectonic background and few drilling wells, effective seismic wave impedance inversion processing and reservoir prediction are the keys to offshore oil and gas resource assessment. For the seriously heterogeneous and complex lithologic association of the Cretaceous sandstone reservoirs in the South Yellow Sea Basin, wave impedance inversion processing is performed for 2D multi-trace seismic data, using the methods of seismic-log sparse impulse joint constrained inversion and low-frequency model building technique under the constraints of structural framework. The wave impedance inversion section may depict spatial distribution pattern of the reservoir, show physical changes inside the reservoir and predict the distribution pattern of the prospective reservoir. The reservoir prediction suggests that the Cretaceous Taizhou Formation has a multi-layer mudstone as hydrocarbon source rocks with low wave impedance, and there are two layers of sandstone reservoirs with high wave impedance. Compared with drilling data, it is proved that the sandstone reservoir is valuable.

Key words: sandstone reservoir; reservoir forecast; sparse impulse inversion; North Depression

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部