

叠前综合反演技术在西湖斜坡WYT地区 储层预测中的应用

朱宝衡

(中国石化上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海, 200120)

摘要: 西湖凹陷平湖构造带武云亭(WYT)地区储层厚度薄, 横向变化快, 常规叠后和单一叠前储层预测方法在该地区存在一定的局限性。针对WYT地区储层开展叠前综合反演技术, 首先利用岩性-物性量板, 采用Ipsom智能判别器实现岩相自动识别; 采用BP神经网络算法, 利用密度、伽马、纵波速度、电阻率, 进行横波速度预测, 降低了横波速度预测的不确定性; 通过岩石物理分析发现, WYT地区砂岩具有较低的纵横波速度比和泊松比特点。在上面研究的基础上开展武云亭(WYT)地区叠前地震随机反演。利用最终反演的弹性参数属性及岩性数据体, 精细恢复和反演了WYT地区平湖组和宝石组的砂岩厚度, 实现了单砂组级别的砂岩空间展布分析, 为WYT地区分析有利砂体展布特征及下步井位提供依据。

关键词: 自动岩相识别; 神经网络算法; 叠前多参数反演; 地震随机反演

中图分类号: P631 文献标志码: A

Application of prestack comprehensive inversion technique to reservoir prediction in WYT area of West Lake Slope

ZHU Baoheng

(Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: The reservoir thickness in the Wuyunting (WYT) area of the Pinghu structural belt in the Xihu Depression is thin, and the lateral change is fast. Hence, the conventional post-stacking and single pre-stacking reservoir prediction methods have specific limitations in this area. The prestack comprehensive inversion technique is developed for the reservoir in the WYT area. Firstly, the lithofacies automatic identification is realized using the lithologic-physical quantity plate and the Ipsom intelligent discriminator. The BP neural network algorithm is used to predict S-wave velocity using density, gamma, longitudinal wave velocity, and resistivity, reducing the uncertainty of transverse wave velocity prediction. It is found through the petrophysical analysis, that the sandstone in the WYT area has the characteristics of lower longitudinal and transverse wave velocity ratios and Poisson's ratios. Based on the above research, a random inversion of prestack earthquakes is carried out in the Wuyunting (WYT) area. Through the elastic parameter attributes and lithologic data of the final inversion, the thickness of sandstones in the Pinghu Formation and Baoshi Formation in the WYT area is finely restored and inverted. The spatial distribution analysis of sandstones at the level of single sand group is realized. It provides the basis for analyzing the favorable sandbody distribution characteristics and the following well location in the WYT area.

Key words: automatic lithofacies identification; neural network algorithm; prestack multi-parameter inversion; seismic random inversion

引用格式: 朱宝衡. 叠前综合反演技术在西湖斜坡WYT地区储层预测中的应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4): 387-392.

ZHU Baoheng. Application of prestack comprehensive inversion technique to reservoir prediction in WYT area of West Lake Slope [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4): 387-392.

1 区域地质概况

平湖构造带是西湖凹陷的主要油气富集区带, 平湖构造带以平湖主断层、武北断层、宝云亭断层等主干断裂为界从北向南分出四大构造带, 即孔雀亭构造、武云亭构造、平湖构造和平南构造。该构

造带也是目前斜坡带勘探程度最高的地区, 三维地震满覆盖, 探井和开发井40余口, 先后发现了平湖

收稿日期: 2022-09-19; 改回日期: 2023-03-17。

作者简介: 朱宝衡(1992—), 硕士, 工程师, 主要从事地球物理勘探相关研究工作, E-mail: zbhcupsin@163.com。

油气田,团结亭、宝云亭、武云亭、孔雀亭油气田^[1-3]。其中武云亭油气田目前已有探井5口,即(WYT-1、WYT-2、WYT-3、WYT-4、WYT-5)。西湖凹陷平湖北部地区总体上以含气为主,且呈“下部干气/湿气-中部凝析气-上部油”的分布规律,这个分布规律与西湖凹陷整体的油气分布规律一致。已发现油气主要集中于始新统平湖组、渐新统花港组,在古新统宝石组也有部分发现。武云亭地区以构造气藏为主,油气发现主要集中在始新统平湖组。

武云亭(WYT)地区平湖组地层与下伏宝石组、上覆花港组地层呈角度不整合接触,厚度分布范围约500~1 500 m。平湖组地层岩性以泥岩为主,夹粉砂岩、砂岩并含大量煤层,是一套形成于以潮坪、潮汐改造的三角洲或河口湾环境的过渡相碎屑海湾充填沉积,自下而上可划分为平湖组下段、中段和上段。其中平上段地层主要为灰—深灰色泥岩与粉砂岩,细砂岩,夹沥青质煤;平中段地层主要发育灰—深灰色泥岩夹薄层细砂岩、粉砂质泥岩、灰质粉砂岩,泥质粉砂岩与灰质粗砂岩,泥岩和煤;平下段地层主要岩性为灰—深灰色泥岩夹薄层细砂岩、粉砂岩和煤。根据岩心观察描述、测井相特征,结合粒度、岩矿分析和区域沉积背景综合分析,研究区平湖组主要发育受波浪影响的潮坪、三角洲等沉积相类型^[4-7]。

2 资料预处理

2.1 测井岩相自动预测

测井资料与录井岩性匹配处理,也是确保后期储层预测的重要内容。由于岩性解释数据来源多样化,不同井段录井的岩性与测井资料往往差异性较大,有一定的位移。因此,需要根据岩性-物性量板,利用测井曲线重新计算并编辑最后的岩性柱状图。Techlog软件中的Ipsom智能判别器自动岩相识别技术在油气藏研究中具有较好的应用效果,能显著提高岩相判别的效率和精度;该方法采用监督和非监督神经网络技术,进行岩相判别和测井数据的地质解释工作,优化岩石物理参数;提供全面的统计工具和精确模型刻度。

测井数据神经网络岩相预测总体来说分为五步,依次是:曲线预处理、神经网络分析、指数化、模型优化(可选)、模型应用。①曲线预处理包括对测井曲线的标准化与环境校正,目的是用来消除测井

数据受到的非地质因素的不确定性影响;②神经网络分析涉及对输入进行聚类,以获得一个向下采样但具有代表性的节点数,通常的输入数据为对岩性相对敏感的曲线;③指数化其特点是具有相似岩石物理性质的节点重新组合,它还可以根据指数化输入为每个节点分配岩相;④模型优化是指可通过手动编辑分类图或定义最佳组数;⑤模型应用指将训练好的模型用来计算分类曲线。

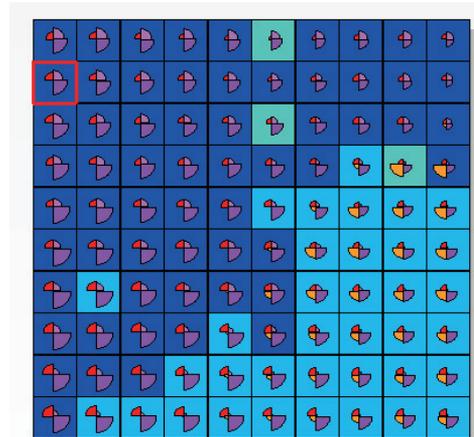


图1 WYT地区岩性预测模型

在测井曲线预处理的基础上,选取对岩性变化相对敏感的自然伽马、密度、电阻率、声波时差等测井曲线作为输入的训练基础数据。考虑到该研究区范围和测井曲线的完整程度,对于武云亭(WYT)训练与预测,且优选的输入曲线因区块不同各不相同,通过IPSOM训练得到不同岩性分类模型(图1)。模型中颜色代表不同岩性,岩相分布概率与模型图中相同颜色方格的多少成正比。将训练结果应用到对应的工区可得到相应的岩性预测曲线,通过将预测曲线与实测曲线对比可知,预测结果与实测岩性分布基本吻合,特别是对于较薄的煤层和砂岩,在预测岩性剖面上也有很好的显示而且与实测结果很接近,观察武云亭(WYT)地区参与训练的井曲线及实测岩性曲线与预测岩性曲线对比剖面图(图2)可知,预测结果的精确度与纵向分辨率都较高,右侧的岩相概率与准确率也在合理的范围,可以认为最终的预测结果可靠。

2.2 神经网络算法横波预测

横波预测方法分为两种,一种是通过传统的经验公式预测横波,另一种是采用神经网络方法来预测横波。经验公式往往是针对某一地区进行统计,应用具有很大的局限性,相比之下,岩石物理建模方法充分考虑到研究区以及目的层段的储层物性,

相对来说更具有针对性,在模型合理情况下应用经验公式来预测横波往往更加准确。神经网络方法通过样本训练,具有较强的非线性映射关系和灵活的分层能力,从而备受关注。

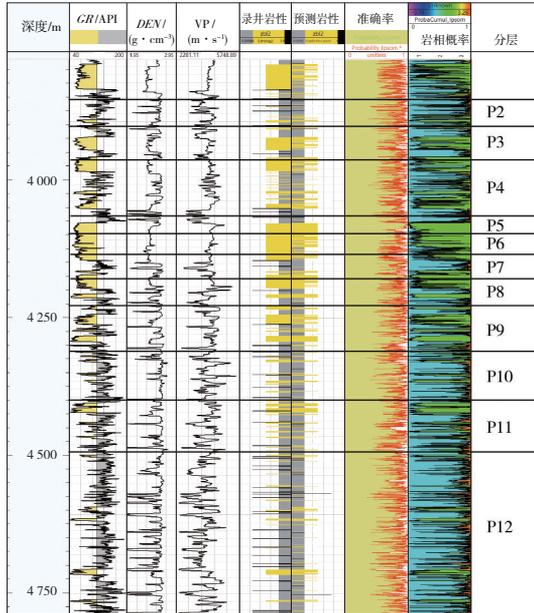


图2 WYT-4井剖面自动岩相识别结果对比

BP神经网络作为多层前馈神经网络,采用误差逆传播算法(Error-Backpropagation Algorithm,简称BP),在储层预测、地层划分等方面得到了广泛应用。BP神经网络包括输入层、中间层(隐含层)和输出层。层与层之间实现全连接,而每层神经元之间无连接。当训练数据输入网络后,神经元的激励值从输入层经各中间层向输出层传播,在输出层的各神经元获得网络的输出响应。接下来,按照最小二乘思路,从输出层经过各中间层逐层修正各连接权值,最后回到输入层。随着这种误差逆传播修正的不断进行,网络对输入模式响应的正确率也不断上升。

BP神经网络中间层的神经元(节点)数目对网络性能有着较大的影响,因此在实际操作中需要通过不断尝试来确定最佳节点数目范围(图3)。本次研究中采用的神经网络拓扑结构,神经元数量为200个,迭代次数为5000次。

以WYT-1、WYT-3、WYT-4井为训练输入集合,并通过训练密度、伽马、纵波速度和电阻率与横波速度之间的非线性映射关系,最终得到神经网络样本,并将WYT-2井作为验证井进行对比校验(图3)。

从测井剖面(图4)可以看出,神经网络模型预测的横波速度与实测的横波速度相关性很高,并且

预测的横波局部较实测结果有所改观,如井中有些实测横波速度出现的尖峰往往是由于测量或提取造成的,而非地层本身的响应特征,这种情况在预测结果中有很好的压制作用。

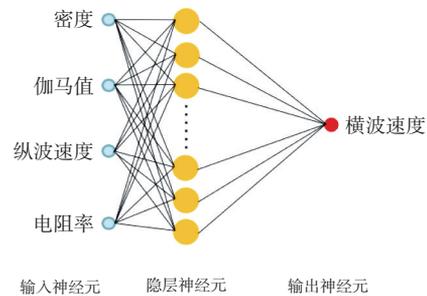


图3 神经网络拓扑结构

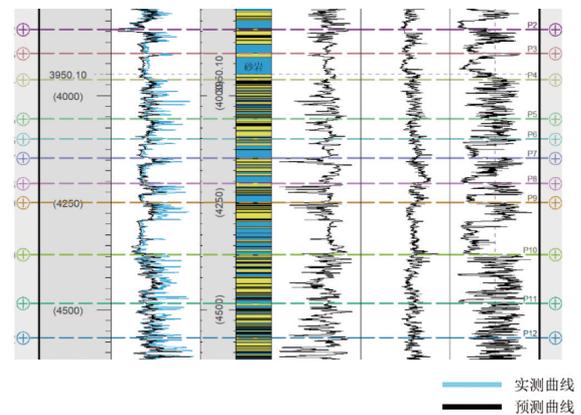


图4 WYT-2井测井剖面

3 WYT地区叠前反演实例

3.1 叠前地震随机反演原理

地震随机反演基于贝叶斯理论,将先验信息构建方法和地球物理反演理论结合在一起。其中最为常见的有结合随机模拟和优化算法的序贯高斯模拟方法和MCMC方法,本文主要采用序贯高斯模拟方法进行反演。

序贯高斯模拟(SGSIM)是较为常见的随机模拟方法,广泛应用于各个行业领域。序贯高斯模拟的思路,是沿某路径依次获取每个采样点处的条件累积分布函数,然后对其抽样,进而获得最终的模拟结果^[15-20]。

随机模拟技术可随机地建立反演参数的概率模型,并通过对联合概率密度进行抽样,来获得一系列反演结果的模拟实现。模拟实现能够很好地表征概率模型的整体相关性以及储层分布的非均质特征。利用随机模拟方法获得反演参数的先验分布以后,再利用非线性反演算法对模拟结果进行优选,获得最终反演结果。

3.2 初始模型建立

利用工区内已有的井资料和加密并且闭合的层位解释结果,建立层控初始模型。由于地震采集系统的限制,采集的地震资料往往缺失低频信息,故地震反演需要进行低频补偿(通过建立低频模型来实现),低频信息通常来自归一化处理后的井资料或进行叠加后的速度资料。通过测井得到的速度和密度资料构建的波阻抗曲线,通过滤波后可以很好地反映研究区大段岩性的变化背景。利用低频滤波后的井波阻抗曲线,经过井间克里金插值得到反演区域的低频模型,该低频模型可以用做地震反演的初始模型。

3.3 地震叠前反演结果

利用录井岩性与测井曲线交会分析,与泥岩相比,虽然砂岩纵波阻抗偏高,但与泥岩混叠区域较大,波阻抗难以有效区分砂泥岩,说明仅仅从波阻抗这个弹性参数区分岩性是不合理的。低伽马值

与砂岩相对应,高伽马值与泥岩相对应,中间值可视为不同泥质含量碎屑岩过渡带。对比分析发现,砂岩往往具有较高的横波阻抗、较低的纵横波速度比和泊松比特征,其他的弹性参数对岩性也有一定的区分度。

在反演过程中,根据多元统计结果,分别在不同层段设置反演变差函数。根据研究区沉积相分析成果,再结合研究区主要的沉积环境,各个层段需要综合参考物源方向、河流分布以及河道延伸距离等地质特征。此外,还需要根据砂体厚度及其发育特征,设置合理的水平和垂向变程参数(图5),分别为平湖组各个层段对应的变差函数。需要通过连井地震剖面来对比验证井-震反演结果合理性与准确率。在此基础上,开展整个区块的叠前反演,将叠前反演属性通过贝叶斯映射转换为岩性数据体,进一步绘制不同区段的砂体厚度分布图以及泊松比和纵横波速比的平面图。

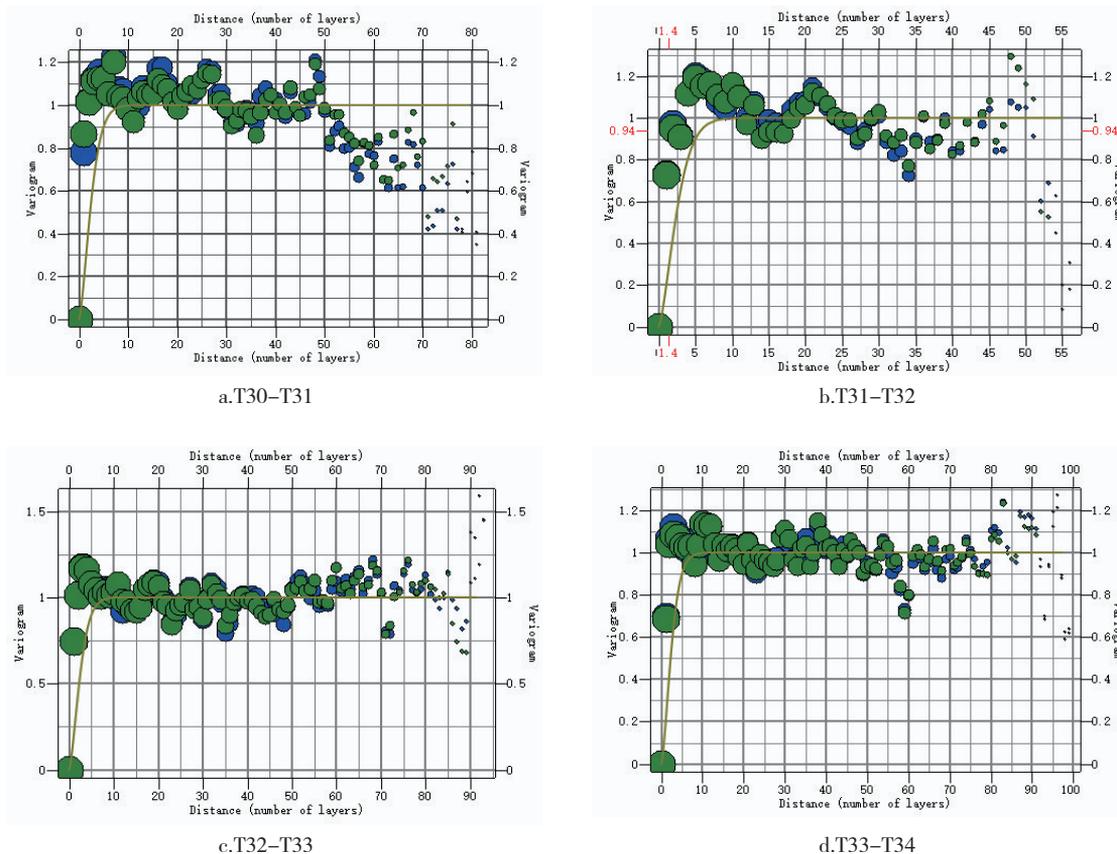


图5 武云亭(WYT)区块不同层段变差函数分析

WYT 区块砂体整体呈现 NW—SE 展布,与西北方向的前缘水下分流河道沉积相的地质认识相一致(图6)。砂体预测厚度平面分布与井上对比,

砂体厚度值较吻合,两者误差较小,平均相对误差为 91.3%。反演岩性数据体与连井剖面对比来看(图7),砂体横向展布与井一致性较好,厚度分布与

并保持一致。砂岩与泥岩的分布及比例关系与平

湖组地层沉积特征相吻合。

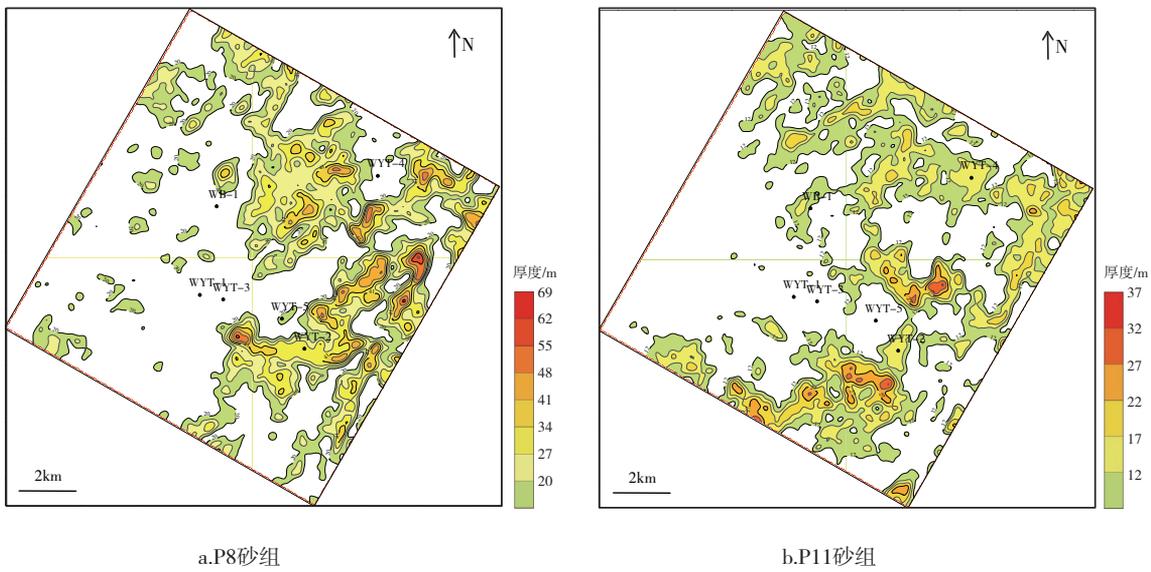


图6 WYT区块重点砂组砂体展布

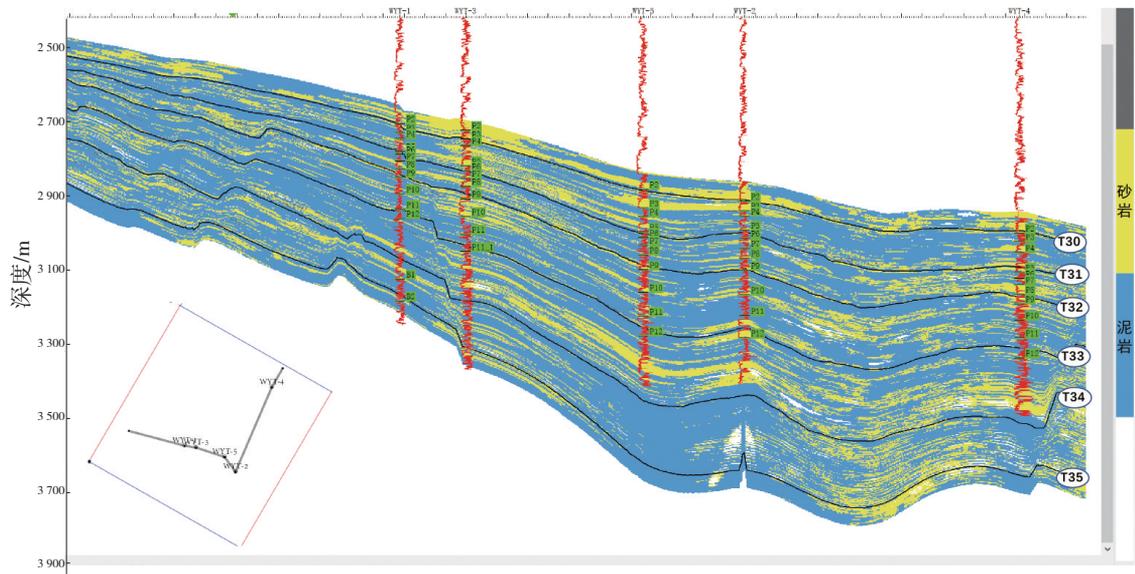


图7 武云亭(WYT)区块岩性反演连井剖面(注:井曲线为GR曲线)

4 结论

(1)借助自动岩相识别、神经网络算法、叠前随机反演等技术,精细恢复和反演了WYT区块的砂岩厚度,实现了单砂组级别的砂岩空间展布分析,整体吻合性较好,符合区域地质规律及认识。

(2)研究发现,WYT地区砂体分布受物源方向及沉积控制作用明显。WYT地区发育北西方向的前缘分支河道,砂体整体表现为北厚南薄特征,整体受北东向断层控制,中部和南部砂体相对发育。

参考文献:

- [1] 胡忠良. 北部湾盆地涠西南凹陷超压系统与油气运移[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 73-80.
- [2] 陈建文, 李刚, 陈国威. 东海陆架盆地西部坳陷带的中生界和古新统油气远景[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(8): 17-19, 58.
- [3] 陈琳琳, 练铭祥. 东海西湖凹陷平湖组储层成因特征及评价[J]. 海洋石油, 1999(4): 7-13.
- [4] 陈琳琳, 王丽顺. 东海西湖凹陷始新统平湖组沉积层序特征及控相机制讨论[J]. 上海地质, 1995(2): 51-61.
- [5] 冯晓杰, 张川燕, 王春修, 等. 东海陆架和台西南盆地中

- 生界及其油气勘探潜力[J].中国海上油气(地质), 2001,15(5):306-310,316.
- [6] 龚建明,陈国威. 西湖凹陷东部断阶带的地质结构与演化[J].海洋地质与第四纪地质,1997(1):34-39.
- [7] 顾惠荣,贾健谊,叶加仁. 东海西湖凹陷含油气系统特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3):295-297,306.
- [8] 符超. 地震相控非线性随机反演方法在湘西北海相页岩气储层预测中的应用[J].工程地球物理学报,2020,17(4):393-398.
- [9] 高扬. 基于地质统计学的地震反演方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [10] 归平军. 深度域地震层位在精细随机反演中的应用[J].物探化探计算技术,2020,42(1):37-41.
- [11] 胡迅. 多点地质统计学叠前同时反演方法研究[D].荆州:长江大学,2020.
- [12] 纪永祯,张渝悦,朱立华,等. 多道随机稀疏反射系数反演[J].石油物探,2020,59(6):912-917.
- [13] 蒋水华,朱明明,曾绍慧,等. 基于贝叶斯更新方法的尾矿坝材料参数随机反演[J].岩土工程学报,2020,42(S2):77-82.
- [14] 李坤,印兴耀. 混合概率模型驱动的叠前地震反演方法[J].石油地球物理勘探,2020,55(4):839-853.
- [15] 李祺鑫,罗亚能,张生,等. 高分辨率波阻抗贝叶斯序贯随机反演[J].石油地球物理勘探,2020,55(2):389-397.
- [16] 李旭. 基于地质统计学的随机反演方法研究与应用[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
- [17] 刘婵娟. 基于横向约束的快速随机反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017.
- [18] 刘彦,胡金民. 叠前弹性反演技术研究及应用[J].地质装备,2008,9(5):25-28.
- [19] 钱玉贵,叶泰然,张世华,等. 叠前地质统计学反演技术在复杂储层量化预测中的应用[J].石油与天然气地质,2013,34(6):834-840.
- [20] 孙月成,周家雄,马光克,等. 叠前随机反演方法及其在薄层预测中的应用[J].天然气工业,2010,30(12):29-32.
- [21] 王江. 叠前去噪与射线弹性阻抗反演方法研究[D].成都:成都理工大学,2013.
- [22] 王丽顺,王岚. 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组层序地层学[J].海洋地质译丛,1997(3):7-12.
- [23] 王小丹,印兴耀,金惠,等. 叠前地震随机反演方法及实际资料应用[J].地球物理学进展,2018,33(6):2471-2476.
- [22] 印兴耀,刘婵娟,王保丽. 基于混合遗传算法的叠前随机反演方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):65-70.
- [23] 于波. 基于地质统计学的叠前随机反演方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [24] 张繁昌,印海燕,翁斌,等. 一种地震共反射点道集数据的叠前反演方法[J].物探化探计算技术,2011,33(1):11-19,117.
- [25] 张广智,赵晨,涂奇催,等. 基于量子退火 Metropolis-Hastings 算法的叠前随机反演[J].石油地球物理勘探,2018,53(1):153-160.
- [26] 章雄,张本健,梁虹,等. 波形指示叠前地震反演方法在致密含油薄砂层预测中的应用[J].物探与化探,2018,42(3):545-554.
- [27] 赵晨,张广智,张佳佳,等. 基于 Metropolis 优化的叠前全局迭代地质统计学反演方法[J].地球物理学报,2020,63(8):3116-3130.
- [28] 邹晓峰. 地震数据约束下的地质统计学反演方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.

(编辑 刘义梅)