

Facies Constrained Stochastic Optimization Seismic Inversion and Application

Weiping Zhao, Ting'en Fan, Lei Yang, Fei Chen, Jing Le

Research Institute, CNOOC, Beijing, China
Email: zwpcug@163.com

Received: May 16th, 2018; published: Jun. 4th, 2018; published: Jun. 11th, 2018

Abstract

The lateral variation of fluvial reservoir is fast, the well pattern is sparse in offshore oilfield, and the uncertainty of conventional logging constrained inversion methods on the prediction of inter-well reservoir is large. In order to improve the precision of logging constrained inversion under the condition of sparse well pattern, a sedimentary facies controlled stochastic optimal seismic inversion method was developed. The initial model integrates sedimentary data, seismic attributes and logging information, and no longer depends on logging information only. In the process of inversion, we adopt the improved stochastic hill-climbing algorithm. First we start with multiple random solutions, and form the set of optimal solutions. Then we find out the global optimal solution, making the synthetic seismograms and seismic records to achieve the maximum degree of similarity, and achieve the goal of global optimal inversion. The application of the real data shows that the initial model established by the facies-controlled stochastic optimization seismic inversion method reduces the reservoir prediction error caused by the lack of wells and uneven well distribution. The model forward seismic data and observational seismic data are matched optimally, and the prediction accuracy of offshore fluvial reservoir is improved.

Keywords

Restriction of Sedimentary Facies, Stochastic Hill-Climbing Algorithm, Logging Constrained, Seismic Inversion, Fluvial Facies

相控随机优化地震反演技术及应用

赵卫平, 范廷恩, 杨磊, 陈飞, 乐靖

中海油研究总院有限责任公司, 北京
Email: zwpcug@163.com

收稿日期: 2018年5月16日; 录用日期: 2018年6月4日; 发布日期: 2018年6月11日

摘要

海上河流相储层横向变化快, 井网稀疏, 常规测井约束反演方法对井间储层预测的不确定性较大。为了提高井网稀疏条件下测井约束反演的精度, 研究形成了相控随机优化地震反演方法。初始模型综合沉积认识、地震属性和测井信息来建立, 不再仅依赖于测井信息来建立。反演过程中采用改进的随机爬山算法, 先从多个随机的解开始, 形成最优解的集合, 再从中找出全局最优解, 使合成地震记录与观测地震记录实现最大程度地相似, 实现反演预测全局最优的目标。通过对实际资料的应用表明, 相控随机优化地震反演方法建立的初始模型降低了因井少、井分布不均衡带来的储层预测误差, 使模型正演地震与观测地震达到最佳匹配, 提高了海上河流相储层的预测精度。

关键词

沉积相约束, 随机爬山法, 测井约束, 地震反演, 河流相

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河流相储层为渤海湾已发现油气田主要的储集类型, 主要特征为砂体厚度薄、横向变化快、井间可对比性差, 因此在纵向上难以精细有效识别隔夹层, 在平面上难以精细描述储层的非均质性[1] [2]。海上油田由于钻井成本高, 相对陆上油田井网较稀, 更需要利用地震横向分辨率高的优势来描述河流相储层的非均质性, 尤其针对海上油田钻井少的特点, 综合应用多种资料来提高储层预测精度。

目前, 地震反演技术是储层预测的有效手段之一。Seymour 等提出了通过井资料插值建立初始波阻抗模型, 经过多次迭代更新波阻抗模型, 使模型正演的地震数据与实测地震资料达到最佳的匹配, 进而得到最终波阻抗的基于模型的反演方法。该方法将测井资料的高频信息补充到地震资料当中, 提高了反演的分辨率, 在储层描述中得到了广泛的应用[3] [4]。基于模型反演最优解的求解方法从线性方法, 如最小二乘法、牛顿法、共轭梯度法等, 发展到非线性方法, 如模拟退火、遗传算法和蒙特卡洛法等, 从寻求局部最优解拓展到了全局最优解。为了降低反演的多解性, 在井资料的基础上, 加入沉积相约束来建立初始模型, 提高了反演精度[5] [6] [7] [8]。

基于模型的反演方法对初始模型的依赖性很强, 在密井网条件下能够建立相对真实反映储层空间变化特征的初始模型, 反演精度较高。但在井网稀疏的海上油田, 初始模型与实际地质沉积储层特征相差较大, 储层反演往往会导致较大的误差, 而且距离井区越远, 误差越大。为了提高井网稀疏条件下基于模型反演的精度, 研究形成了相控随机优化地震反演方法。初始模型的建立综合沉积认识、地震属性和测井信息, 不再仅依赖于测井信息。反演过程中采用改进的随机爬山算法, 先从多个随机的解开始, 形成最优解的集合, 再从中找出全局最优解, 使合成地震记录与观测地震记录实现最大程度地相似, 达到反演预测全局最优的目标。将该技术应用于海上河流相储层的反演, 取得了较好的效果。

常规地震反演仅采用地震解释层位作为约束, 将测井信息按照反距离加权方法进行内插外推, 是一种渐变的预测, 对井间厚度变化大、沉积相变化快的区域无法准确预测, 对反演精度影响较大, 定量解释误差大。本文加入沉积相控制建立低频模型, 综合利用了地质信息和井间储层发育规律, 考虑了沉积

微相模型对属性参数平面上的刻画能力，结果与实际地下地质情况更加吻合。

2. 关键技术及流程

相控随机优化地震反演方法是一种基于模型的反演方法。该方法通过敏感地震属性、测井信息和地质认识建立主要目的层段各小层的二维沉积相图，在此基础上，结合层位和断层，建立三维相模型。在三维相模型的约束下，采用插值算法对井点波阻抗进行内插外推，建立初始波阻抗模型。增加沉积相约束，可以进一步降低因井少、井分布不均衡带来的储层预测误差。另一方面，反演过程中采用改进的随机爬山算法，该方法先从多个随机的解开始，形成最优解的集合，再从中找出全局最优解，使合成地震记录与观测地震记录实现最大程度地相似，达到反演预测全局最优的目标，避免了常规随机爬山法容易产生局部最优解的弊端。

相控随机优化地震反演技术主要流程如图 1 所示。相控随机优化地震反演技术主要技术流程为：① 基于测井曲线开展岩石物理分析，对自然伽马曲线、波阻抗曲线、电阻率曲线进行交会分析，明确波阻抗值是否能区分储层，只有当波阻抗能识别储层时波阻抗反演才有意义；② 对地震数据的频率范围、主频、保幅性进行分析，以及分析采集脚印对目的层的影响；③ 检查测井曲线的质量，参考 VSP 或声波曲线，提取井旁道地震子波进行标定。先整体漂移，再局部调整，建立精确的井震关系；④ 根据先验地质信息、测井信息和地震信息，采用分级控制、旋回对比的方式构建精细等时地层格架；⑤ 综合先验地质信息、测井信息和敏感地震属性，形成每个小层的沉积相图，并形成三维相模型；⑥ 以相模型为约束，对已知井的波阻抗进行内插外推，建立初始波阻抗模型；⑦ 通过调整反演参数进行相控反演试验和效果分析，确定最优的参数设置，对研究区进行沉积相控制下的随机优化地震反演，以获取高质量反演数据体。

2.1. 子波提取与井震标定

精细的井震标定是做好地震反演的基础，其中从地震资料中提取的子波是关键，子波品质的优劣直接影响到反演效果。因此提取子波时要关注几个关键点：一是子波的长度约为 100 ms，过长则旁瓣严重；二是为了提高子波的稳定性，估算子波的时窗长度必须为子波长度的 3 倍或 3 倍以上；三是子波的品质以其波形稳定，能量集中在子波中间的主瓣上，同时旁瓣迅速衰减为佳。

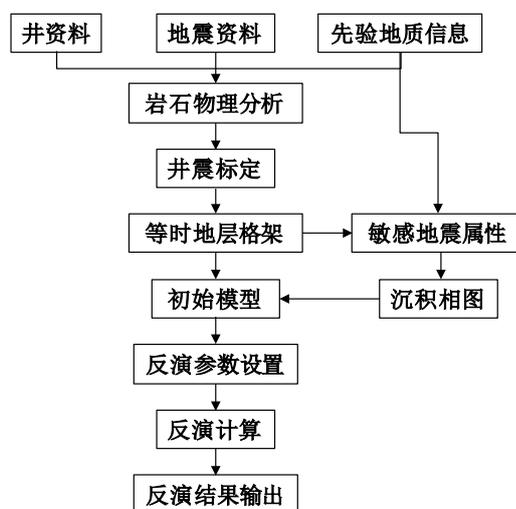


Figure 1. Facies controlled stochastic optimization of seismic inversion process

图 1. 相控随机优化地震反演技术流程

在合成地震记录制作过程中, 根据地震资料的频谱特征, 考虑区域构造背景、空间速度变化规律等因素, 实现高精度合成地震记录制作。首先考虑地震资料的频谱特征, 用理论雷克子波作为合成记录的初始子波, 按照地质分层数据, 参考声波速度进行地震反射层位的初步标定, 当合成地震记录与实际地震记录基本一致时, 从相应的目的层段提取实际地震子波, 再做层位的精细标定。为了使合成记录的标定在横向上统一, 把单口井合成记录投到连井剖面上, 进行空间的层位一致性标定, 可以避免单井标定不准而产生的横向速度异常。

2.2. 相控建模技术

当井较少或者井分布不均衡时, 随机优化测井约束地震反演技术可以加入沉积相的约束来降低储层预测误差。沉积微相成果来源于对研究区的测井解释、岩心分析、砂体在空间上的发育模式等研究成果。获得的沉积微相成果有沉积微相图和相边界数据, 为了把沉积微相成果应用到反演计算中, 将相图数字化到地质模型中得到相模型。具体的做法是: 1) 从沉积相图提取出各沉积微相的相边界, 并按照与实际工区的坐标比例关系, 给相边界线赋予与工区一致的坐标值; 2) 将相边界投影到等时地层格架中对应的小层, 在小层中给相边界圈定的网格赋予某一特定整数作为其相代码, 用来对该微相进行标识, 不同的沉积微相赋予不同的相代码; 3) 将不同层的沉积相图按上述步骤数字化到等时地层格架模型中, 最终形成三维的沉积相模型。

在同一沉积相单元里面, 沉积岩具有相同的成因, 其物性也具有相似性, 而不同相单元的物性则具有差异性, 若在地质建模时不考虑这种空间变化差异性, 统统利用所有井数据来建模, 无疑会使地质模型的准确度降低。既然在同一相里物性相近, 其值域也限定在特定范围内, 那么建模时可以只利用同相中的数据来完成对该相的地质建模, 而舍弃对其他相单元数据的使用, 这样就提高了地质模型的精度。因此, 在三维沉积相模型约束下建立地质模型, 求取某一网格点的波阻抗时, 先根据该网格点的相类型标识数字, 搜索并提取出该小层中与其属于同一沉积微相的井数据, 然后内插外推求取该网格点的波阻抗。最后重复上述步骤最终建立初始地质模型。

2.3. 相控随机优化反演技术

相控随机优化测井约束地震反演技术是以地震资料为基础, 结合沉积相认识, 以已知井的测井资料为约束, 采用随机优化算法, 使合成地震记录与实际地震记录最大程度地相似, 达到反演预测的目的。该方法从井约束地质模型出发, 采用改进的随机爬山法全局寻优, 使经过修改的地质模型正演合成的地震数据与实际观测的地震资料达到最佳匹配。改进的随机爬山法在每次迭代更新模型时, 既能在高温时进行稀疏点搜索, 又能在低温时于当前模型进行搜索, 从而加快了迭代和收敛速度。该方法能较好的将已知井数据的高频成分和低频成分用于弥补地震频带宽度的不足, 反演出高分辨率的波阻抗剖面, 提高井间储层预测的精度。

3. 海上油田案例分析

渤海 QHD32-6 油田构造复杂, 有利储层分布受到构造和岩性双重因素的影响, 目前该油田进入高含水、综合调整阶段。主力含油层系为明化镇组下段, 是曲流河沉积, 储层砂体厚度较薄, 横向变化快, 导致纵横向油水分布关系复杂, 难以进一步提高采收率, 而且中后期调整注水效率低, 难以取得较好的开采效果。在 QHD32-6 油田应用相控随机优化测井约束地震反演技术, 最大限度的挖掘测井、地震和地质信息, 对岩性进行精细预测, 为油田开发方案调整提供更精细的技术保障[9] [10]。

根据研究区测井数据进行岩石物理分析, 获取砂岩与泥岩的阻抗差异信息, 从图 2 可以看出, 砂岩表现为低阻抗特征, 泥岩表现为高阻抗特征, 波阻抗对岩性具有较好的区分能力。因此, 采用相控随机

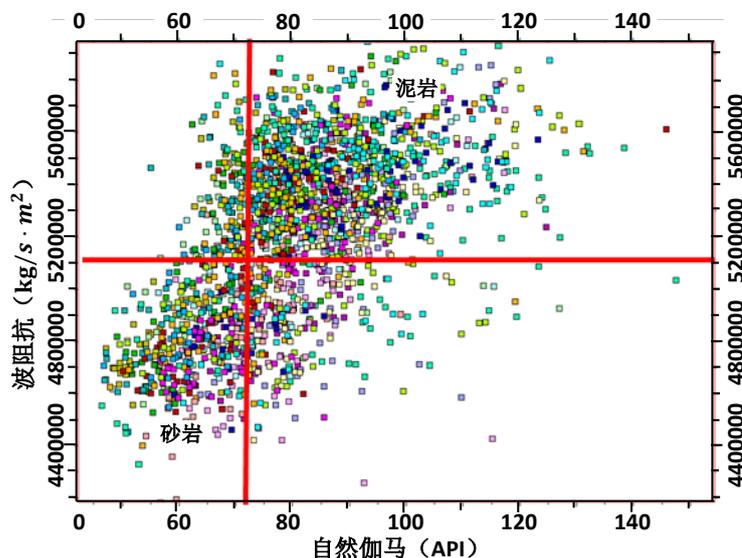


Figure 2. Cross plot of impedance and natural gamma ray
图 2. 波阻抗与自然伽马交会图

优化测井约束地震反演技术反映波阻抗体来进行岩性预测是可行的。

精细的井震标定是确保高质量的地震反演结果的关键环节。经过精细的井震标定，横向各井之间标准层的标定具有良好的统一性。经过精细调整，得到井间一致性较好的合成地震记录，同时也得到了各井的平均速度。经精细标定后，目的层段合成地震记录与实际地震记录相关系数数全部在 0.7 以上，84% 的井相关系数大于 0.8，如图 3 所示。

在合成地震记录标定基础上对构造进行精细解释，建立初始地质模型，并将油田的沉积微相图和相边界数据数字化到地质模型中得到三维相模型，如图 4 所示，将其应用到反演过程中。通过改变反演参数进行相控反演试验和效果分析，确定合理的参数设置，对研究区进行沉积相控制下反演，获得相控反演数据体。反演结果的合理性与否影响到储层预测的可靠性。本次从井点、剖面及平面三个方面对相控反演成果进行了分析评价[11]。

井点反演效果检验主要是看参与反演井旁道与实际井曲线的吻合程度，即钻遇井处的砂体，是否在反演剖面上都能体现出来。图 5 为相控反演剖面，可以看出，井点反演结果能较好地体现井点砂体发育程度。由于反演方法考虑了薄层砂体的预测，厚度在 5 m 以上的砂体在反演剖面上都有较好的刻画，从这点而言，相控反演同时也实现了对储层的高分辨预测。

通过反演剖面叠加原始地震信息对反演效果进行剖面检验，分析二者的一致性。如果反演结果随着地震资料的变化而变化，说明反演结果尊重了原始地震信息，是合理的；否则，反演结果不合理。从图 6 可以看出，叠加了原始地震数据的反演剖面显示，反演结果随振幅强弱、波形特征变化而变化，说明反演数据尊重了原始地震信息，是合理的。

反演结果的平面检验是通过提取各小层反演砂体的厚度或视厚度，分析其平面变化规律与沉积规律是否具有 consistency。图 7(a) 为参与相控约束反演的 Nm1-3 小层的沉积微相，图 7(b) 为在相控反演数据体上提取的 Nm1-3 小层波阻抗平均值，其中蓝色代表低阻抗值，红色代表高阻抗值。可以看到，低阻抗值代表砂体发育的区域，与沉积微相的河道、河漫滩的分布趋势基本一致，即反演结果能较好的体现研究区的沉积特征和砂体展布规律。

相控随机优化反演方法是地质、地震结合的一种新途径，克服了以往仅参考地震和井信息的缺点，

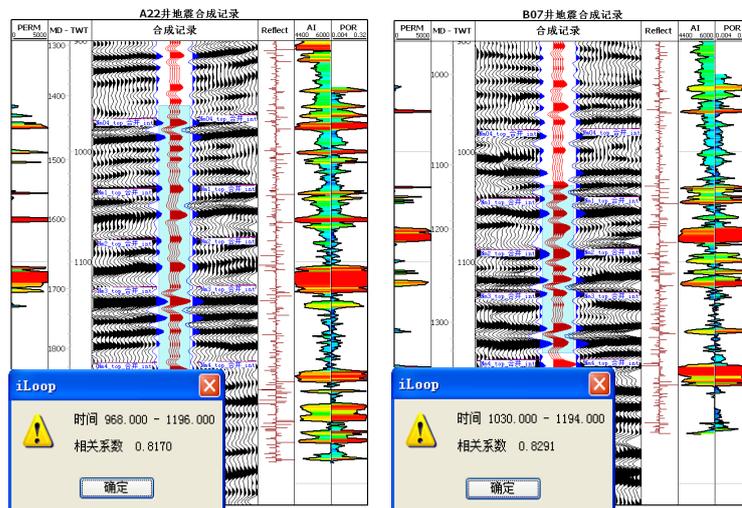


Figure 3. Synthetic seismic record of well A22 and well B07
图 3. A22 井(左)和 B07 (右)井地震合成记录

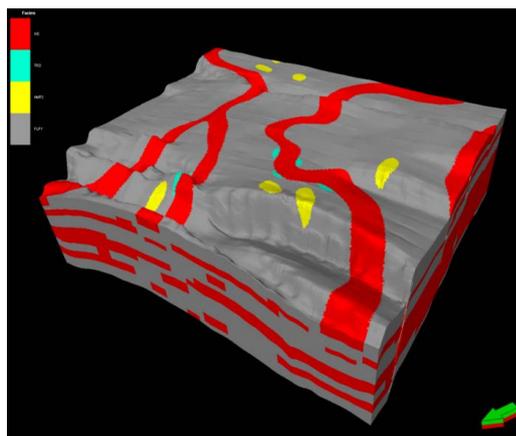


Figure 4. 3D facies model
图 4. 三维相模型

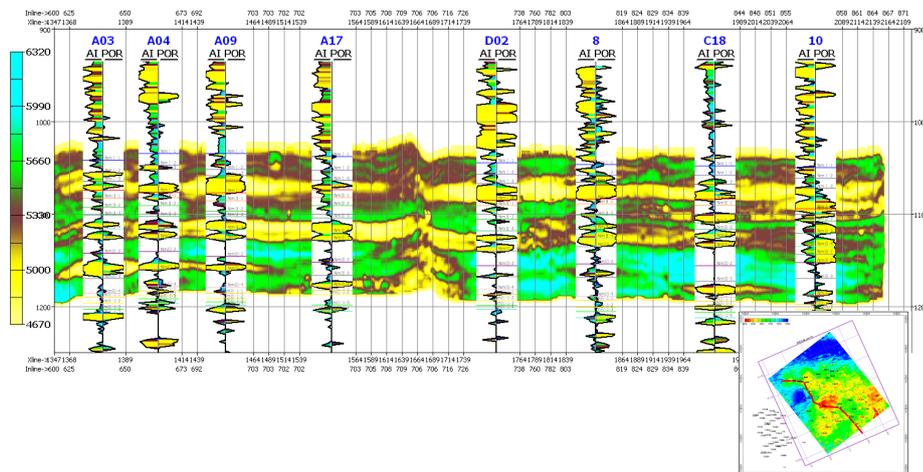


Figure 5. Through-well A03-A04-A09-A17-D02-8-C18-10 facies constrained seismic inversion profile
图 5. 过 A03-A04-A09-A17-D02-8-C18-10 井相控反演剖面

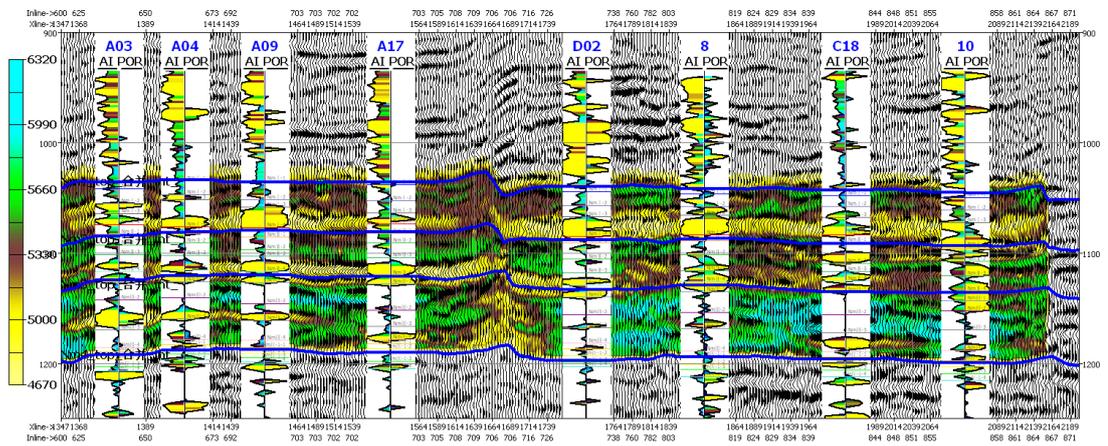


Figure 6. Congruent map of inversion profile and seismic profile through-well A03-A04-A09-A17-D02-8-C18-10
图 6. 过 A03-A04-A09-A17-D02-8-C18-10 井相控反演剖面与原地震叠合图

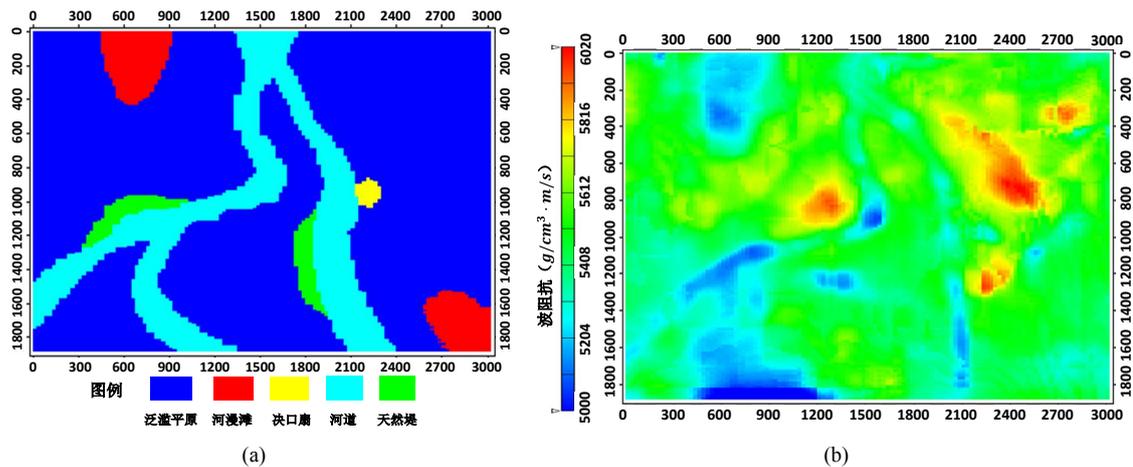


Figure 7. Sedimentary micro-facies map and average impedance of Nm1-3 layer
图 7. Nm1-3 小层沉积微相图和波阻抗均值图

既实现了相模型对地震反演的约束，显著降低了反演的多解性，也实现了地震数据对地质现象的高精度描述。

4. 结论

1) 相控随机优化测井约束地震反演技术充分利用了测井资料中的低频和低频信息，有效弥补了地震数据有限带宽的不足，在海上河流相储层反演的实际应用中实现了对储层砂体的高分辨率预测，增加的相控约束使得反演结果能够较好的体现研究区的沉积特征和砂体展布规律，进一步降低因井少、井分布不均带来的储层预测误差。

2) 相控随机优化测井约束地震反演在典型海上河流相油田 QHD32-6 储层研究中得到了有效应用，预测砂体厚度既忠实于井上真实的砂体厚度值，又利用了井间丰富的地震信息，预测结果更加可靠，因此该技术在海上油田可以推广应用。

基金项目

国家科技重大专项项目(2011ZX05024001)。

参考文献

- [1] 范廷恩, 李维新, 王志红, 等. 渤海渤中 34 区河流相储层预测与描述技术研究[J]. 中国海上油气, 2006, 18(1): 13-16.
- [2] 闵小刚, 康安, 周守信. 秦皇岛 32-6 油田北区三维相控地质统计建模与反演[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 325-329.
- [3] 赵庆国, 赵华, 朱应科. 测井约束地震反演技术在河 4 井复杂断块区的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6): 706-710.
- [4] 徐丽萍. 测井约束地震反演技术在塔河油田碎屑岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2009, 48(6): 591-595.
- [5] 姜素华, 王永诗, 林红梅, 等. 测井约束反演技术在不同类型沉积体系中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 587-590.
- [6] 姜雄鹰, 傅志飞. 高分辨率地震反演技术及应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 271-276.
- [7] 李锋, 罗涛. 高分辨率测井约束地震反演技术在本布图地区的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(3): 255-256.
- [8] Huang, W. and Zhou, H.-W. (2015) Least-Squares Seismic Inversion with Stochastic Conjugate Gradient Method. *Journal of Earth Science*, 26, 463-470. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0553-8>
- [9] 马平华, 霍梦颖, 何俊, 等. 渤海湾盆地秦皇岛 32-6 油田曲流河沉积体系综合解剖[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 567-574.
- [10] 周新茂, 胡永乐, 高兴军, 等. 曲流河单砂体精细刻画在老油田二次开发中的应用[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3): 284-287.
- [11] 黄宣皓, 尚建林, 王林生, 等. 测井约束随机优化地震反演预测百 21 井区薄层砂体[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 341-344.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org