



段南. 2019. 叠前地震波形指示反演在薄互储层预测中的应用. 地球物理学进展, 34(2): 0523-0528, doi: 10.6038/pg2019CC0023.

DUAN Nan. 2019. Application of prestack seismic waveform indicates inversion in thin reservoir prediction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(2): 0523-0528, doi: 10.6038/pg2019CC0023.

## 叠前地震波形指示反演在薄互储层预测中的应用

### Application of prestack seismic waveform indicates inversion in thin reservoir prediction

段南

DUAN Nan

伦敦帝国理工学院地球科学与工程学院, 伦敦 SW72AZ, 英国

Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London, London SW72AZ, Britain

**摘要** 地震波形指示反演在高频段通过将地震波形信息代替变差函数,使得反演过程及结果能够更好的体现了“相控”的概念,并且能够有效提升预测储层纵向及横向分辨率,在薄层、薄互储层预测上是地质统计学反演之外一种新的、更高效的反演手段.针对J4井区纵波阻抗无法有效识别河道砂薄互储层的问题,通过横波速度估算,计算得到一系列弹性参数,优选出对砂泥岩识别最敏感的弹性参数,创新尝试在叠前域使用地震波形指示反演敏感参数体,最终达到对目标薄互储层“定量”识别的目的.应用结果表明:在叠前域使用地震波形指示反演代替常规反演可以很好的解决薄层预测中纵横向分辨率不高、纵波阻抗无法有效识别砂泥岩的问题,对同类型储层定量预测具有一定的借鉴意义.

**关键词** 叠前波形指示反演;弹性参数;薄储层预测;水下分流河道砂

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2019CC0023

**Abstract** The seismic waveform indication inversion embodies the concept of “phase control” by using seismic waveform information to replace variation function in high frequency band. The technology improves the vertical and horizontal resolution of the reservoir effectively, and it is a new inversion method to identify thin and mutual reservoir as well as geostatistical inversion. The poststack seismic waveform indication inversion has advantages in the prediction of thin reservoir, while the prestack elastic parameters are richer and more sensitive to reservoir. In response to the failure of the impedance of J4 area to effectively identify the thin channel sand reservoir, the target thin layer is achieved qualitative identification by using transverse velocity estimation, elastic parameter calculation and optimization. Application results show that in prestack domain using seismic waveform indicates inversion can well solve the problem of vertical and horizontal resolution is not high and the wave impedance cannot effectively identify sand and mudstone. The method has a reference to the quantitative prediction of the same type reservoir.

**Keywords** Prestack seismic waveform indicates inversion; Elastic parameters; Thin reservoir prediction; Underwater distributary channel sand

## 0 引言

随着勘探工作的不断深入,油气勘探逐步进入隐蔽油气藏阶段,河道砂、滩坝砂等薄层、薄互储层已成为勘探重点目标.但上述类型储层砂体纵向叠置、厚度薄,横向分布零散,加之受地震资料分辨率影响大,导致储层定性、定量预测难度大.目前,叠前、叠后反演已成为薄储层定量预测的最主要手段.20世纪90年代中后期,杨文采(1995)、张厚柱等(1995)、王兴泰等(1996)、张繁昌等(1997)等采用模拟退火、人工神经网络、混沌反演等系列非线性反演方法实现了薄储层定量描述;徐丽英等(2006)、孙学栋等(2011)等借助

谱分解技术,确定薄砂体调谐频率范围,最终利用共频体进行薄储层预测;杨锴等(2012)将测井数据、井间地震数据和地面数据联合约束下,通过地质统计学随机建模,有效的提高了反演精度.近年来,高君等(2017)创新在地震波形约束下实现了地震波形指示反演,该反演结果在空间上体现了地震相的约束,平面上更符合沉积规律,更好的体现出“相控”的思想,很好的实现了叠后薄储层反演预测.在叠前反演方面,Connolly(1999)利用Aki&Richards近似关系推到了弹性阻抗表达式,得到了横波速度、密度、泊松比等一系列弹性参数,使得弹性参数反演得到了快速发展;孙月成等(2010)借助叠前随机反演方法对薄层砂体进行描述,较好地刻画出了储

收稿日期 2018-07-16; 修回日期 2019-01-14.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 中国石油化工股份有限公司项目(P12047)资助.

第一作者简介 段南,男,1995年生,本科毕业于爱丁堡大学地球物理学专业,目前伦敦帝国理工大学硕士在读,研究方向为石油地质.  
(E-mail: duan950106@gmail.com)

层空间分布;姚云霞等(2011)借助叠前纵横波联合反演技术在PH油田HA薄储层进行了预测,取得了良好应用效果;顿宗萍(2015)通过优选岩石骨架优选方法建立合理的岩石物理模型,最大程度估算出横波速度,通过优选岩性油藏敏感参数对营子街地区深层河道砂进行了较好的反演预测。

基于叠后地震波形指示反演在薄储层预测上的优势,以及叠前弹性参数较叠后更加丰富、对储层有更高敏感性的特点,本文创新尝试对河道砂薄储层在叠前域进行波形指示反演,取得了良好的反演效果。

## 1 地震波形指示反演方法原理

目前流行的应用于薄储层预测的高分辨率反演是地质统计学随机反演,反演中频受地震约束,高频借助变差函数分析,利用井随机模拟,最终获得一系列随机解的分布。地质统计学主要问题是:反演结果随机性强,计算效率低;变差函数拟合难度大,反演效果不理想;非相控反演,横向分辨率低,无法预测横向变化快的砂体。

地震波形指示反演是在地震波形特征指导下(相控)对反射系数组合寻优的过程,是传统地质统计学基础上衍生出的一种新的针对储层纵向厚度薄、横向变化快、非均质性强的反演方法。其理论根基是三维地震是分布密集的空间结构化数据,反映了沉积环境和岩性组合的空间变化;其理论核心是地震波形指示反演利用地震波形相似性优选相关并样本,参照样本空间分布距离和曲线分布特征建立初始模型,代替变差函数分析空间变异结构,对高频成分进行无偏最优估计。反演结果在空间上体现了地震相的约束,平面上更符合沉积规律,更好的体现出“相控”的思想(图1)。

波形指示反演技术实现流程为(图2):

(1)对已知井进行地震波形特征分析,筛选与待判别道波形高相似度的井进行初始模型建立,同时统计其阻抗作为先验信息;

(2)匹配地震阻抗与初始模型得到似然函数;

(3)以贝叶斯框架为基础,通过结合先验分布与似然函数得到后验概率分布,即目标函数。

通过扰动模型参数,选取多次最大后验概率密度函数值取平均作为期望值输出(韩长城等,2017)。

地震波形指示反演技术优势:充分利用地震信息指导井信息进行高频模拟,很大程度上减少了地震噪声对反演结果的影响;在地震高频段使用地震波形特征取代变差函数来识别储层空间结构变化,在有效提高纵向分辨率的同时,很好的提高了反演结果的横向分辨率,对平面地质规律吻合度更高;通过借助全局优化算法,提高了反演的确定性;该反演不受限于井位的分布位置,有更高的适用性。

## 2 叠前地震波形指示反演技术流程

将地震波形指示反演技术从叠后应用到叠前,技术关键是在道集优化处理、分角度道集叠加、横波估算、弹性阻抗曲线计算、弹性参数计算、敏感参数选取等流程的基础上,通过波形指示反演算法计算出各个角度的弹性阻抗体,最终得到与地质目标最敏感的泊松比、纵横波速度比等叠前弹性参数反演体,进而“定量”识别薄层、薄互储层(图3)。

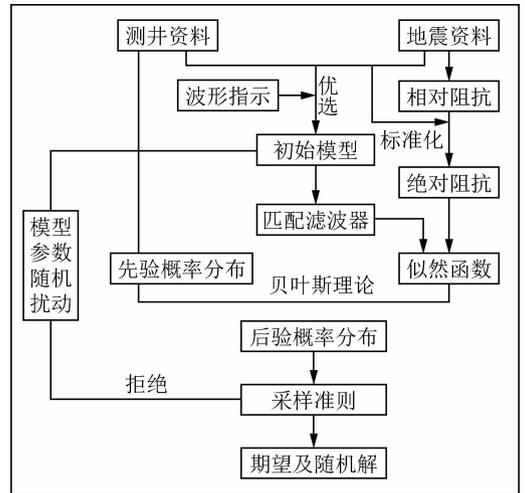


图2 波形指示反演流程图

Fig. 2 The flow chart of waveform indicates inversion

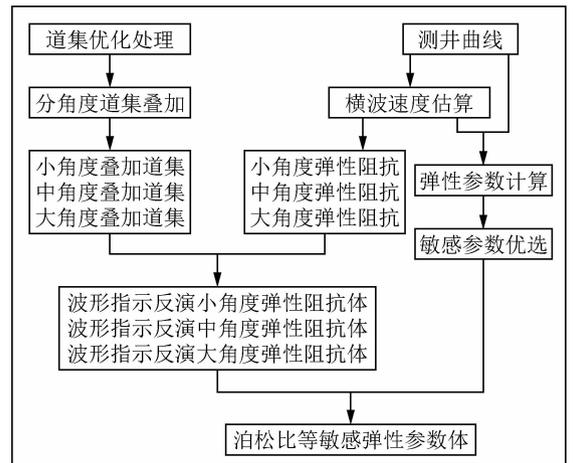


图3 叠前波形指示反演流程图

Fig. 3 The flow chart of prestack waveform indicates inversion

## 3 应用实例

J4井区构造上位于济阳拗陷惠民凹陷,北邻惠民中央隆起带(盘河构造主体部位),南部通过夏口断裂带,工区面积约20 km<sup>2</sup>(不含JX2块),2013年新采集临南高精度三维地震资料覆盖整个勘探区。井区内多口井在沙三上三角洲前缘水下分流河道钻遇油层,其中J4井沙三上钻遇油层10 m/2层,试油48 m<sup>3</sup>/d,揭示了该区沙三上水下分流河道薄互储层良好的勘探潜力(图4)。

### 3.1 叠前波形指示反演可行性分析

对目的层进行交汇分析发现波阻抗无法有效区分砂泥岩,不具备叠后波阻抗反演条件,同时研究区具有河道砂储层薄的特点,最终综合分析选用叠前波形指示反演对储层进行精细描述。J4井区被2013年新采集高精度三维地震覆盖,该资料最大偏移距5201 m,最高覆盖次数达到247次,沙三上目的层最大入射角达到30°。地震资料经过叠前保幅处理

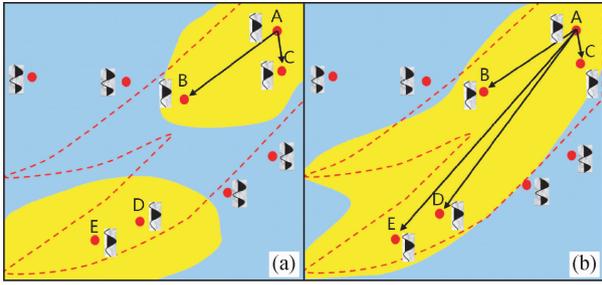


图1 样本统计示意图

(a) 变差函数法; (b) 波形指示法.

Fig. 1 Schematic diagram of sample statistics

(a) The variation method; (b) The waveform indicator method.

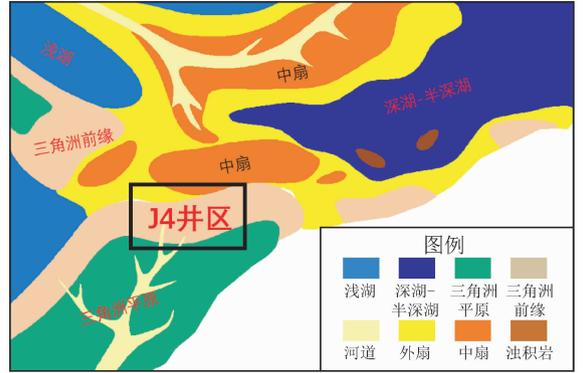


图4 J4井区沉积相图

Fig. 4 The sedimentary facies of J4 well area

后,信噪比有较好提升,满足叠前弹性阻抗反演资料品质需求.

3.2 分角度叠前道集叠加

叠前弹性参数反演线性算法需要2个叠加数据体,而非线性迭代和非线性非迭代算法则需要至少3个叠后数据体,

因此叠前道集部分叠加是叠前弹性参数反演的基础(管路平,2008).为得到稳定反演体,在分析J4井区所在地区AVO特征的基础上,确定采用分角度叠前道集叠加,选取4°~12°、12°~20°、20°~28°三个角度扇区进行叠加,最终得到8°、16°、24°三个角度叠加数据体.

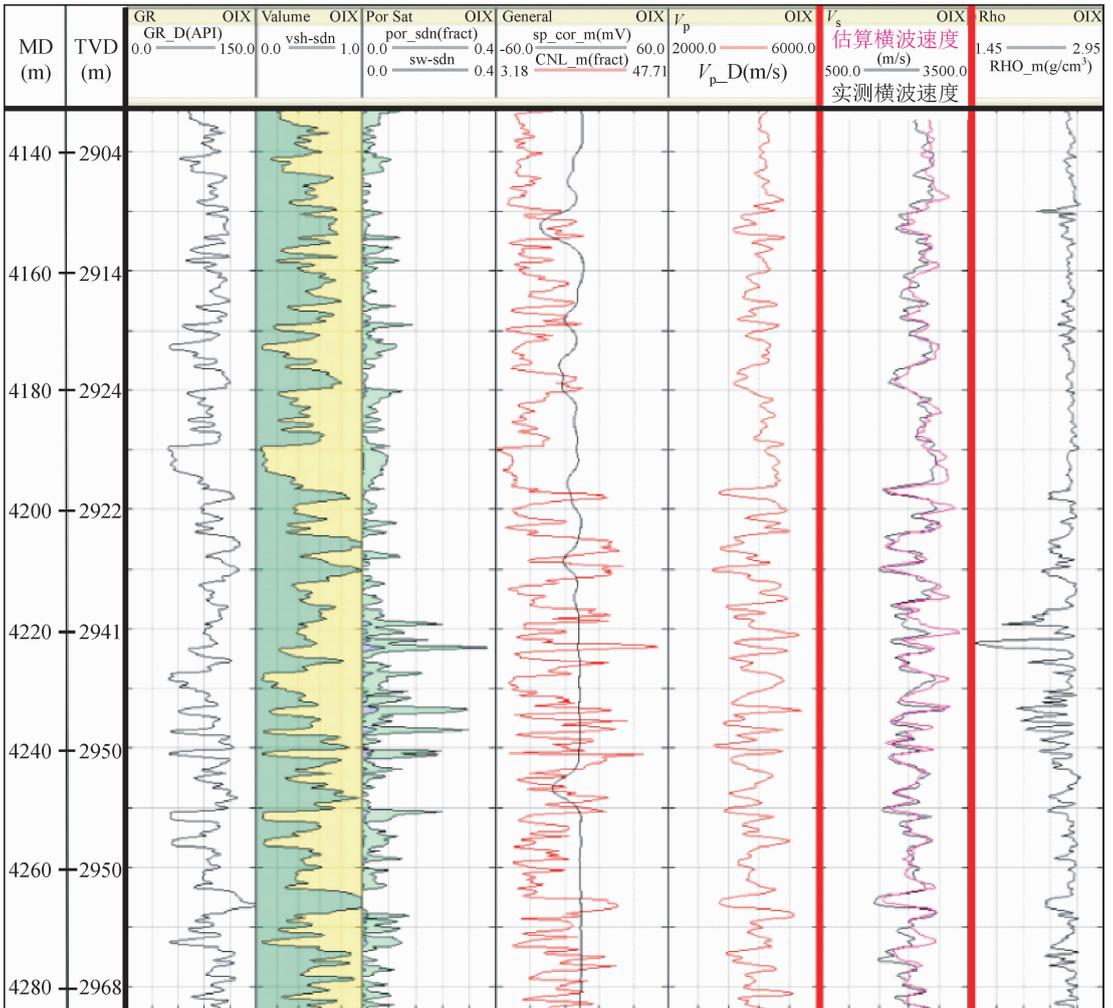


图5 J403井横波估算图

Fig. 5 J403 well shear wave estimated figure

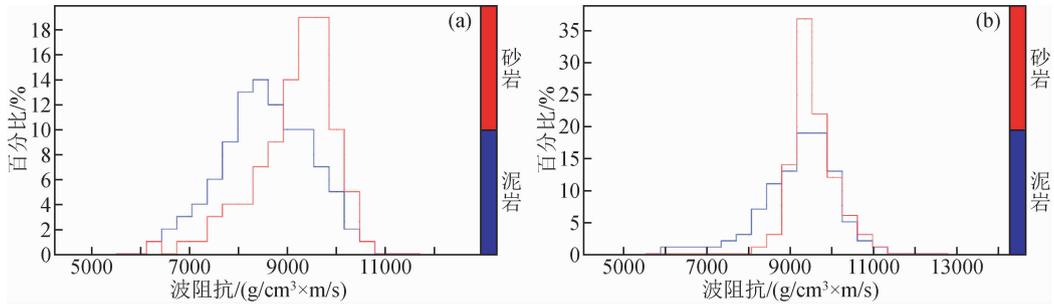


图6 J4和J211井纵波阻抗砂泥交汇直方图

Fig. 6 The histogram of the vertical impedance of sandstone and mudstone of well J4 and J211

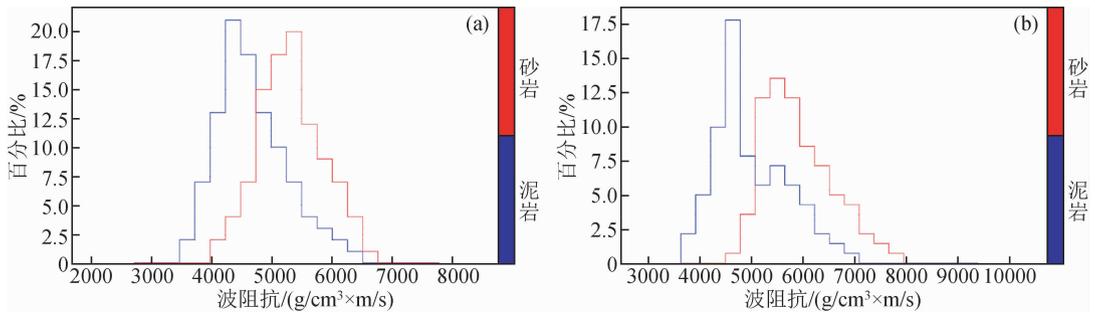


图7 J4和J211井横波阻抗砂泥交汇直方图

Fig. 7 The histogram of the shear impedance of sandstone and mudstone of well J4 and J211

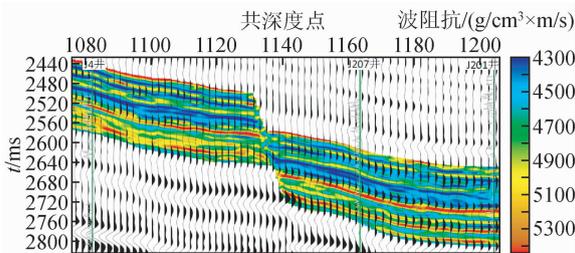


图8 叠前波形指示反演过井剖面图

Fig. 8 The cross well profile of prestack waveform indication inversion

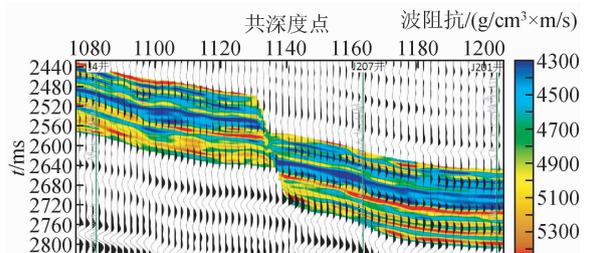


图9 叠前地质统计学反演过井剖面图

Fig. 9 The cross well profile of prestack geostatistical inversion

### 3.3 横波估算

准确的横波测井速度是进行叠前弹性参数反演的必要参数,但是实际生产中由于各种原因往往缺乏横波速度信息,为此横波速度的估算成为叠前反演的必要步骤。目前横波估算主要有经验公式法、统计法、直接测定法和岩石物理模型法等技术方法(杜向东,2014)。统计法需要通过较多的实测横波速度与其他曲线进行拟合分析,最终估算出横波速度,J4井区仅有一口实测横波速度井,因此该方法不可使用;直接测定法受限于现场实验设备制约,可操作性不强;岩石物理模型法考虑了影响岩石速度的各类型因素,其估算的横波速度更为准确,本文选取该方法进行横波速度估算。研究区J403井有横波测井数据,通过选取Xu-White法、颗粒支撑法和基质支撑法作为岩石骨架混合模型,估算J403井横波速度,与实测速度相似系数分别为0.79、0.7和0.86,为此

最终优选岩石物理模型法(基质支撑)对J4井区其他井进行横波速度估算(图5)。

### 3.4 敏感参数选取

利用纵波速度、估算横波速度以及密度曲线,计算得到研究区各井泊松比、纵横波速度比、横波阻抗等一系列岩石物理弹性参数,通过对各参数与研究区沙三上目的层砂泥岩进行直方图交汇分析,最终选取对砂泥岩区分度最高的横波阻抗(SI)弹性参数作为叠前反演对象。

以J4、J211两口井为例进行分析:图6为两口井沙三上目的层纵波阻抗与砂泥岩交汇直方图,横坐标为纵波阻抗,纵坐标为百分比,红色为砂岩、蓝色为泥岩。直方图表明在目的层段,纵波阻抗对砂泥岩区分度差,因此无法进行叠后波阻抗反演。图7为横波阻抗与砂泥岩交汇直方图,从图中可以看出,砂岩与泥岩横波阻抗数值虽有重合,但总体上砂岩

高横波阻抗, 泥岩低横波阻抗, 可选取横波阻抗作为叠前弹性反演目标参数。

### 3.5 应用效果分析

根据敏感参数优选, 选取横波阻抗 SI 作为反演参数目标。通过对全区参与反演的 10 余口井进行直方图交汇综合分析, 反演砂泥岩门槛值为  $4950 \text{ g/cm}^3 \times \text{m/s}$ 。由于 SI 对砂泥岩区分存在重合区域, 对反演门槛值附近选取渐变过渡色, 反演结果大于  $4950 \text{ g/cm}^3 \times \text{m/s}$  为砂岩储层为主, 低于  $4950 \text{ g/cm}^3 \times \text{m/s}$  则为泥岩为主。图 8 所示近南北向反演剖面, 自南向北依次为 J4、J207、J208 井, 井旁曲线为自然电位曲线, 其中 J207 井未参与反演运算, 为后验井。通过反演剖面可以得出以下结论: 叠前地震波形指示反演对孤立分布的单砂体纵向识别能力强, 对纵向砂泥互层也有较好分辨率, 但是相对单砂体识别精度相对较差, 这与前期岩石物理交汇分析得出的砂岩高横波阻抗、泥岩低横波阻抗、砂泥岩横波阻抗有重合区域这一认识相吻合; 后验井 J207 虽未参与反演计算, 但预测储层和实钻井有较好的吻合, 这就验证了叠前地震波形指示反演对无井区预测有较高的可信度。

图 9 为叠前地质统计学反演过井剖面, 对于反演结果剖面显示, 采用与叠前波形指示反演相同的软件及色标。反演过程中均采用相同地震体、相同井数据, 且两种反演过程中均尽可能的选取各种反演参数的最优设置。对比两种反演结果发现:

- (1) 两种反演方法对孤立单砂体均有较好的识别能力;
- (2) 对于砂泥薄互层, 叠前波形指示反演纵向分辨能力明显高于叠前地质统计学反演;
- (3) 对于低井控反演区 (J4 井与 J207 井之间), 叠前波形指示反演基于其纵、横向识别能力强的特点, 反演信息更为丰富。

## 4 结论

(1) 地震波形指示反演是在高频段将地震波形特征代替变差函数, 体现“相控”思想, 是传统地质统计学基础上衍生出的一种新的针对储层厚度小、横向变化快、非均质性强的井震结合反演方法。

(2) 叠前弹性参数因为引入横波信息而比纵波阻抗信息更加丰富, 在叠后地震波阻抗不能很好的区分砂泥岩储层时, 通过计算得到泊松比、纵横波速度比、横波阻抗等一系列岩石物理弹性参数往往能够对砂泥岩目的层有较好区分。

(3) 针对滩坝砂、河道砂等薄储层预测, 当叠后纵波阻抗无法有效区分砂泥岩时, 通过计算、优选对砂泥岩敏感的弹性参数, 对其进行叠前地震波形指示反演, 最终可以达到对目标薄储层“定量”描述的目的。

**致谢** 感谢北京中恒利华石油技术研究所提供软件支持! 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见和编辑部的大力支持!

## References

Connolly P. 1999. Elastic impedance [J]. *The Leading Edge*, 18(4): 438-452.

Du X D. 2014. Shear wave velocity delicate estimation based on Trivariate Cauchy constraint AVO inversion [J]. *Progress in*

*Geophysics (in Chinese)*, 29(2): 0681-0688, doi: 10. 6038/pg20140228.

Dun Z P. 2015. Study on tight sandstone reservoir prediction in Yingjizie area, Huiming Sag [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 54(2): 241-248.

Gao J, Bi J J, Zhao H S, et al. 2017. Seismic waveform inversion technology and application of thinner reservoir prediction [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 32(1): 142-145, doi: 10. 6038/pg20170119.

Guan L P. 2008. Prestack inversion and direct hydrocarbon indicator [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 47(3): 228-234.

Han C C, Lin C Y, Ren L H, et al. 2017. Application of seismic waveform inversion in E4s beach-bar sandstone in wangjiaogang area, Dongying Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (in Chinese)*, 41(2): 60-69.

Sun X D, Zhao J R, Bai J. 2011. Spectrum decomposition application in thin-reservoir prediction in changshaling belt of yinger depression [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 46 (supplement 1): 72-75.

Sun Y C, Zhou J X, Ma G K, et al. 2010. Stochastic pre-stack seismic inversion and its application to thin layer prediction [J]. *Natural Gas Industry (in Chinese)*, 30(12): 29-32.

Wang X T, Li X Q, Sun R G. 1996. The inversion of resistivity sounding curve using genetic algorithms [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 39(02): 279-285.

Xu L Y, Xu M J, Chen Z Y. 2006. Using spectrum decomposition technique for prediction of thin reservoir [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 41(3): 299-302.

Yang K, Ai D F, Geng J H. 2012. A new geostatistical inversion and reservoir modeling technique constrained by well-log, crosshole and surface seismic data [J]. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 55(8): 2695-2704, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 08. 022.

Yang W C. 1995. BG-inverse scattering method for inversion of seismic wave field [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 38(03): 358-366.

Yao Y X, Liu J, Zhang L. 2011. An application of prestack simultaneous inversion of P and S wave to thin reservoir prediction in PH field [J]. *China Offshore Oil And Gas (in Chinese)*. 23(6): 377-379.

Zhang F C, Yin X Y, Wu G C, et al. 1997. Impedance inversion by using annealing neural network [J]. *Journal of University of petroleum, China (in Chinese)*, 21(6): 16-18, 23.

Zhang H Z, Yang H Z, Xu B Y. 1995. Interval velocity inversion by genetic algorithm [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 30(5): 633-644.

## 附中文参考文献

杜向东. 2014. 基于三元柯西约束 AVO 反演的横波精细估算方法 [J]. *地球物理学进展*, 29(2): 681-688, doi: 10. 6038/pg20140228.

顿宗萍. 2015. 惠民凹陷营子街地区深层致密砂岩储层含油性预测 [J]. *石油物探*, 54(2): 241-248.

高君, 毕建军, 赵海山, 等. 2017. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用 [J]. *地球物理学进展*, 32(1): 142-145, doi: 10. 6038/pg20170119.

管路平. 2008. 地震叠前反演与直接烃类指示的探讨 [J]. *石油物探*, 47(3): 228-234.

韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 2017. 地震波形指示反演在东营凹陷王家岗地区沙四上亚段滩坝砂的应用 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 41(2): 60-69.

孙学栋, 赵建儒, 白军. 2011. 谱分解技术在营尔凹陷长沙岭地区薄

- 储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 46(增刊1): 72-75.
- 孙月成, 周家雄, 马光克, 等. 2010. 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, 30(12): 29-32.
- 王兴泰, 李晓芹, 孙仁国. 1996. 电测深曲线的遗传算法反演[J]. 地球物理学报, 39(02): 279-285.
- 徐丽英, 徐鸣洁, 陈振岩. 2006. 利用谱分解技术进行薄储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 41(3): 299-302.
- 杨锴, 艾迪飞, 耿建华. 2012. 测井、井间地震与地面地震数据联合约束下的地质统计学随机建模方法研究[J]. 地球物理学报, 55(8): 2695-2704, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.022.
- 杨文采. 1995. 地震波场反演的BG-逆散射方法[J]. 地球物理学报, 38(03): 358-366.
- 姚云霞, 刘江, 张雷. 2011. 叠前纵横波联合反演技术在PH油气田薄储层预测中的应用[J]. 中国海上油气, 23(6): 377-379.
- 张繁昌, 印兴耀, 吴国忱, 等. 1997. 用模拟退火神经网络技术进行波阻抗反演[J]. 石油大学学报:自然科学版, 21(6): 16-18, 23.
- 张厚柱, 杨慧珠, 徐秉业. 1995. 用遗传算法反演层速度[J]. 石油地球物理勘探, 30(5): 633-644.