

文章编号:1009-9603(2023)01-0069-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202012029

基于生物启发算法的地震双极性变换 拟声波测井约束反演方法应用 ——以塔河油田 S9702 井区石炭系超深薄砂层为例

李新华,马洪涛,梁宏刚,邓 锋,先 伟,孙 力
(中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河油田石炭系超深薄砂层地震响应复杂,声波时差、密度测井曲线对储层敏感性差,地震属性和现有反演方法对储层的预测精度不能满足油气藏精细开发的要求。提出基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波测井约束反演方法,首先利用生物启发算法对不同相位地震资料进行双极性变换,使其具有双极性特征,提高了地震资料的视分辨率,绝大部分薄砂层有地震反射同相轴与其对应,改善了薄砂层与地震响应之间的关系;其次开展自然电位、自然伽马测井曲线拟声波重构,增强了反演参数的储层敏感性,因此反演过程仅需较低程度的测井约束,反演结果与地震资料相关性好,降低了多解性,提高了储层预测的可信度。利用该方法在塔河油田 S9702 井区可以识别埋深达 5 000 m、厚度大于 3 m 的石炭系超深薄砂层,且误差较小,窄河道形态较清楚,砂体展布符合地质规律。

关键词:薄砂层;地震双极性变换;生物启发算法;石炭系;塔河油田

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Application of pseudo-acoustic wave log constraint inversion method with seismic bipolarity transform based on bio-inspired algorithm: A case study of carboniferous ultra-deep thin sand layer of Well S9702 area in Tahe Oilfield

LI Xinhua, MA Hongtao, LIANG Honggang, DENG Feng, XIAN Wei, SUN Li

(Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Northwest China Petroleum Bureau, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: The seismic response of the carboniferous ultra-deep thin sand layer in Tahe Oilfield is complex. The interval transit time and density logging curve are less sensitive to reservoirs, and the seismic attribute and the existing inversion methods cannot meet the requirements of fine development of oil and gas reservoirs in terms of reservoir prediction accuracy. Therefore, this paper proposes a pseudo-acoustic wave log constraint inversion method with seismic bipolarity transform based on bio-inspired algorithm. Specifically, the paper uses the bio-inspired algorithm to perform bipolarity transform on seismic data with different phases to make the data bipolar, which enhances the visual resolution of the data. In addition, most of the thin sand layers have corresponding seismic reflection events, which improves the relationships between thin sand layers and seismic responses. Then, the paper reconstructs pseudo-acoustic wave by self potential and natural gamma log curves to strengthen the reservoir sensitivity of inversion parameters. As a result, the inversion process only requires low-level log constraint, and the inversion results have a positive correlation with seismic data, which decreases the ambiguity and increases the reliability of reservoir prediction. The carboniferous ultra-deep thin sand layer, with a depth of 5 000 m and a thickness of more than 3 meters of Well S9702 area in Tahe Oilfield, can be identified by the proposed method and the error is small. The narrow channel morphology is relatively clear, with the distribution of sand bodies in line with the geological law.

Key words: thin sand layer; seismic bipolarity transformation; bio-inspired algorithm; carboniferous; Tahe Oilfield

收稿日期:2020-12-11。

作者简介:李新华(1965—),男,新疆奎屯人,研究员,硕士,从事油田开发和油藏管理工作。E-mail:18999831176@163.com。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程项目”(2016ZX05053)。

塔河油田石炭系卡拉沙依组发育构造、岩性和地层等多种油气藏类型,其油气成藏受断裂、微幅度构造、储盖组合及沉积储层等因素控制。卡拉沙依组为砂泥岩互层,沉积类型为三角洲相与潮坪相交互沉积,其中北部主要为三角洲相,南部为潮坪相^[1-2]。研究区S9702井区沉积主要受三角洲相控制,发育分流河道和河口坝砂体;钻井揭示,其卡拉沙依组砂层埋深为4 800~5 300 m,单期次河道宽度为150~500 m,厚度主要为2~8 m,宽厚比为50~150,单砂层厚度薄;地震资料频带窄(为5~65 Hz),主频低(为32 Hz),分辨薄砂层的能力差,地震振幅属性预测储层精度约为65%、预测含油气性吻合率约为45%,不能满足油田精细开发的要求。

针对塔河油田石炭系储层预测已开展较多研究^[3-4],不同类型的测井约束反演方法使石炭系储层预测精度有一定程度的提高,可达到75%。对于储层厚度大、地震响应较好的层段,储层预测精度达到80%左右,但对于层位标定相位不一致,地震响应差的薄砂层,由于测井约束反演结果受地震和测井资料的双重控制,测井信息在反演结果中的合适频率范围较难确定,薄砂层的反演效果差。

笔者提出基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波测井约束反演方法,该方法基于地震相位变换理论,利用生物启发算法^[5],获得具有双极性特征的地震数据,提高地震资料的视分辨率,改善薄砂层与地震响应的对应关系,使得大部分砂层标定在波峰或波谷位置。选取储层敏感性强的测井曲线重构的拟声波作为测井约束,提取和应用合适极性的子波,仅需较低程度的测井约束量即可反演出储层,提高了地震资料的储层反演效果。

1 塔河油田石炭系薄砂层地球物理特征及预测难点分析

1.1 地球物理特征

塔河油田石炭系薄砂层砂泥岩声波时差较为复杂,整体上砂岩声波时差小、速度高,砂岩含流体后声波时差变大,砂泥岩速度差异变小,甚至泥岩速度大于砂岩速度。物性较差偏干的砂岩,声波时差小、速度大。稳定的较厚泥岩整体声波时差大、速度小,砂泥岩薄互层中的泥岩常常声波时差小、速度大。砂泥岩声波时差、密度、自然电位和自然伽马统计关系表明,自然电位对砂泥岩的敏感性强,自然电位差异大;自然伽马对泥质砂岩、砂质泥岩等岩性的敏感性强^[6]。

研究区石炭系卡拉沙依组砂层的地震响应比较复杂,储层厚度、物性、流体类型、砂泥岩组合、上下围层泥岩速度及构造位置等因素影响储层地震响应特征,较大厚度(大于5 m)的含油气储层一般表现为强振幅低频特征,较小厚度储层一般为弱振幅或与上下围岩形成复合波,振幅值受围岩影响较大。靠近地层剥蚀面的储层受上覆地层屏蔽作用,地震响应一般为弱振幅或与上覆地层一起形成强振幅。另外由于砂泥岩速度不稳定、储层厚度变化及地震资料分辨率限制,使得储层标定相位不统一,一部分储层标定于波峰位置,一部分储层则标定于零相位或波谷位置^[7]。

1.2 预测难点分析

塔河油田石炭系卡拉沙依组薄砂层预测难点主要表现在3个方面:①盐边(石炭系巴楚组膏盐尖灭线附近)石炭系卡拉沙依组为三角洲前缘沉积,水下分流河道发育,砂体横向变化快,纵向厚、薄砂体叠置共存,储层预测横向上需反映三角洲前缘沉积特征,纵向上需同时识别厚层和薄层砂体。②石炭系卡拉沙依组含油气层段埋深大,含油气层段纵向跨度长,声波时差储层敏感性较低,不同层段砂岩和泥岩地震响应复杂,地震属性预测储层多解性强。50余口井含油气储层统计结果表明,厚度大于5 m的油气层或水层在振幅上有较好的响应,一般为中强振幅;另外大部分反射波不是单一砂体的响应,而是多套储层和泥岩地层的综合响应。③靠近地层剥蚀区附近储层地震响应影响因素多,地层剥蚀带附近上覆地层屏蔽效应造成地震反射空白现象或强反射波,地震反射为储层和上覆地层综合响应,地震属性无法精确反映储层特征。总之,塔河油田石炭系卡拉沙依组薄砂层预测难点在于薄砂层与地震响应的匹配性较差,地震资料分辨率受储层构造位置、厚度、物性及流体类型等多种因素影响,地震反射波不能较好地反映薄储层的变化,致使储层预测精度较低。

2 基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波测井约束反演方法

塔河油田石炭系卡拉沙依组储层地球物理特征及预测难点分析表明,振幅、频率、频谱等地震属性对于较厚砂层(厚度大于5 m)的预测精度较高,对于薄砂层(厚度为2~5 m)的预测误差大,基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波测井约束反演是一种适应石炭系卡拉沙依组地质特征的薄储

层预测新方法。首先开展不同相位地震资料的基于生物启发算法的地震双极性变换,使大部分储层都标定于波峰或波谷,提高薄砂层与地震反射波的对应关系;其次,利用储层敏感性强的自然电位等测井曲线重构储层敏感性差的声波曲线,以作为地震反演的低频约束,弥补薄砂层地震响应弱的缺陷,并提高反演波阻抗分辨薄互层砂体的能力^[8]。

需要指出的是,对于部分强地震反射特征的厚层泥岩,新反演方法与其他反演方法存在同样的问题,较多的低频测井约束压制强反射的相对波阻抗,井间会有一定的内插痕迹,降低反演结果的可信度,而较少的低频测井约束不能较好地压制强反射的相对波阻抗,储层和非储层反演波阻抗有一定程度的重叠,反演结果具有多解性,需根据地质要求优选合理的测井约束的低频分量^[9-10]。

2.1 基于生物启发算法的地震双极性变换

测井约束地震反演方法的思路是测井低频和地震中高频波阻抗有机结合识别储层,储层测井低频波阻抗和地震中高频波阻抗大小一致时,储层波阻抗信息得到加强,识别效果好;储层测井低频波阻抗和地震中高频波阻抗大小不一致时,储层波阻抗信息被中和,识别效果差^[11-12]。正或负极性子波地震反演只能识别标定在波峰或波谷的储层,而不能把标定在波峰和波谷的储层同时识别出来,通过基于生物启发算法的地震双极性变换处理,对波谷进行相位翻转,使标定在波谷的储层变成标定于波峰,而原标定在波峰的储层仍然标定于波峰,同时生成新的波谷地震同相轴,地震数据具有正负双极性特征,这样地震反演则能把标定在原始地震资料波峰和波谷的储层同时预测出来。而且地震双极性变换后,由于大部分砂体标定在波峰或波谷,反演时只需较低测井波阻抗信息约束即能将砂体识别出来,反演结果主要依赖地震资料,井间内插痕迹小,河流相砂体形态可靠,保证了反演结果的精度。

对地震数据取绝对值能使地震波谷变成波峰,但取绝对值的地震数据都大于等于0,不能用于反演。减掉某一平均值能使地震数据有正有负,但幅值较小的波峰、波谷变成了负值,相当于损失部分弱信号信息,地震反演效果较差。

2.1.1 生物启发算法

通常意义下生物启发算法是指与生物行为相关的仿生算法,亦称生物启发式算法,其模拟自然界中生命与智能的生成与进化过程,具有自学习、自组织和自适应特征。典型的生物启发算法有:遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、蚁群算法

(ACO)、人工蜂群算法(ABC)、细菌觅食算法(BFO)、群搜索算法(GSO)、DNA算法、膜算法(MC)和自组织迁移算法(SOMA)等。

应用于石油地球物理的单一生物启发算法有蚁群算法^[13]、遗传算法、粒子群优化算法、DNA算法、神经网络等,但应用效果不突出,主要因为单一的生物启发算法常常不能最优地解决石油地球物理问题。蚁群算法的优点是对目标体细节的精细刻画,也造成了算法收敛求解速度慢,运算时间长,搜索一定程度后出现停滞,不能对全局进一步搜索,影响得到最优解;初始信息素浓度、搜索步长不易控制,过少过小,搜索范围小,陷入局部最优解;过多过大,追踪范围大,不是最优解^[13-14]。遗传算法的优点是能很好地处理约束,跳出局部最优,最终得到全局最优解,全局搜索能力强,能识别较大级别的地质体;缺点是局部搜索能力较弱,对较小级别的地质体识别能力差,且运行时间长,容易受参数的影响。粒子群优化算法的优点是快速逼近最优解,但该算法的早熟收敛特性对于复杂地质体则不能准确识别;DNA算法的基因序列编码复杂,编码误差放大特征明显,识别的地质体不清晰、不到位。

笔者提出的生物启发算法是根据不同的地质条件优选2种或2种以上单一生物启发算法融合进行地震资料的双极性变换处理,使算法有效联合、扬长避短,从计算精度、时间、算法的可融合性和地质研究要求等方面比对不同单一生物启发算法的效果,组合试算,优选计算结果精度高、计算时间少的算法组合。主要采用2种算法融合方式:一是以一种生物启发算法的最终计算结果作为另一种算法的初始值,例如以粒子群优化算法或遗传算法的计算结果作为蚁群算法的初始值,提高蚁群算法的计算速度和寻优能力;二是每一次迭代计算互为下一次迭代的初始值,提高计算收敛速度和获得全局最优解^[15]。

生物启发算法对地震资料同相轴的波形、连续性、振幅、相位、方差等属性特征具有较高的敏感性,能识别地震道与道之间的细微变化,实现对地震信息的精确拾取。首先,进行生物启发算法优选;通过对蚁群算法、遗传算法、粒子群优化算法^[16]、DNA算法、群搜索算法、膜算法和自组织迁移算法等计算特点的分析,初步优选蚁群算法、遗传算法、粒子群优化算法作为地震双极性变换的初选算法。接着,进行生物启发算法融合;将粒子群优化算法或遗传算法的计算结果作为蚁群算法的初

始值,提高蚁群算法的计算速度和寻优能力。粒子群优化算法和遗传算法计算速度快,全局寻优能力强,可以减少蚁群算法的迭代收敛次数,克服蚁群算法运算速度慢的劣势,进而发挥不同算法全局和局部寻优的优势(图1)。

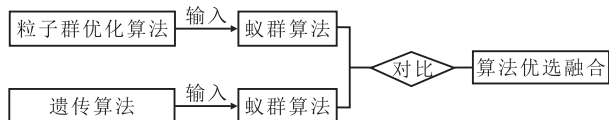


图1 生物启发算法优选融合流程

Fig.1 Fusion flow of bio-inspired algorithm optimization

2.1.2 地震双极性变换

利用生物启发算法实现地震双极性变换的具体步骤为:①对原始地震资料进行 $\pm 90^\circ$ 和 180° 相位变换。②利用遗传算法和粒子群优化算法对原始地震资料(0° 相位)计算初始值。③分别以遗传算法和粒子群优化算法计算结果的初始值进行蚁群算法地震波峰同相轴追踪,优选算法组合和蚁群算法优化参数,得到波峰顶部位置小于等于1、其他位置为0的蚁群追踪数据体(图2)。④利用优选的算法组合和蚁群算法优化参数,进行 $\pm 90^\circ$ 和 180° 相位地震生物启发算法波峰追踪,并将 $\pm 90^\circ$ 相位变换的生物启发算法计算数据乘以-1以便生成波谷。⑤原始地震资料和相位变换地震资料与其对应生物启发算法数据相乘,并将结果相加,得到原始地震资料和 180° 相位变换数据为波峰, $\pm 90^\circ$ 相位变换数据为波谷的地震双极性变换数据。

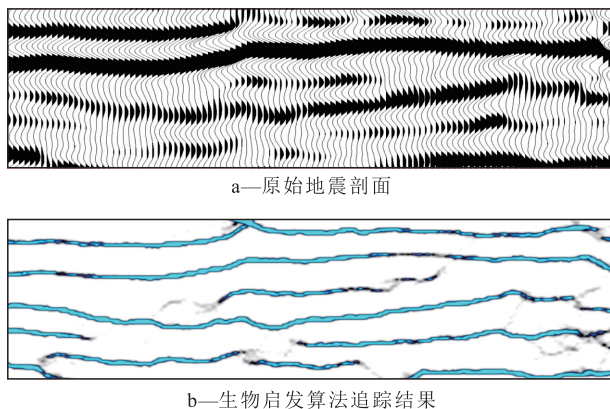


图2 原始地震剖面 and 生物启发算法追踪结果对比

Fig.2 Comparison between original seismic section and tracking results by bio-inspired algorithm

粒子群优化算法和遗传算法分别与蚁群算法融合计算地震双极性变换结果显示,地震同相轴都得到较好的识别,且粒子群优化算法较有优势,同相轴边界和弱反射识别更清楚,与原始地震数据吻合程度高。粒子群优化算法和蚁群算法融合计算的塔河油田石炭系卡拉沙依组目的层段地震双极

性变换的结果更精确(图3)。

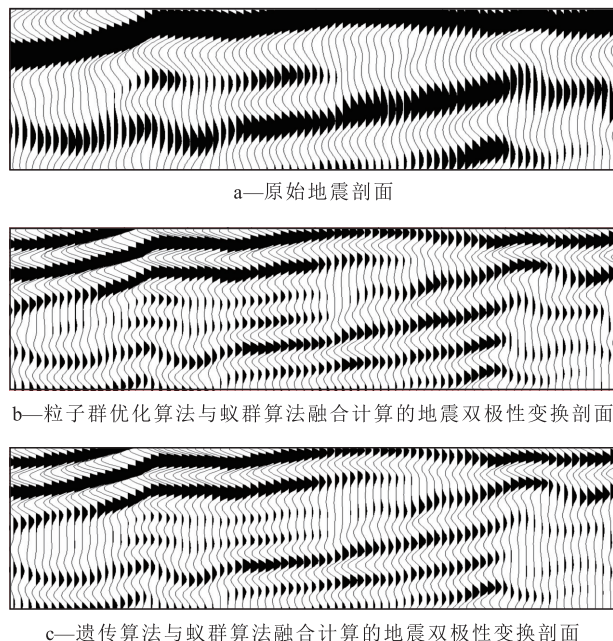


图3 原始地震剖面 and 不同算法融合计算的地震双极性变换剖面

Fig.3 Original seismic section and seismic bipolarity transform sections calculated by fused different algorithms

将原始地震剖面与地震双极性变换剖面叠合对比(图4),其中黑色为原始地震剖面,红色为地震双极性变换剖面,原始地震剖面的波谷翻转为波峰, 0° 相位转变为波谷,实现了地震双极性变换,地震资料视主频由40 Hz提高到70 Hz,实际钻井标定砂体顶界均位于波谷位置,底界位于波峰或偏上位置。

2.2 拟声波测井约束反演

塔河油田石炭系卡拉沙依组的声波时差测井数据影响因素多,储层敏感性较差,自然电位测井数据的储层敏感性最强,自然伽马测井数据次之。砂岩与泥岩自然电位测井曲线数值差异大,位于有利储层边界附近的砂质泥岩、泥质砂岩与泥岩的自然电位测井曲线数值差异小,自然伽马测井曲线常有一定程度的差异,因此利用自然电位和自然伽马测井曲线重构声波时差测井曲线,开展拟声波测井约束反演可以提高砂泥岩分辨能力,有效识别厚、薄砂岩及泥岩。

2.2.1 自然电位、自然伽马测井曲线拟声波重构

大部分拟声波重构方法是建立目的层段声波时差与自然电位或自然伽马等单一储层敏感性测井数据的拟合关系,由于二者的相关系数比较小,获得的拟声波时差数据基本与储层敏感性测井数据相似,与实际的声波时差数据相差甚远^[17]。笔者提出的储层拟声波重构方法仅改变砂岩等岩性的声波时差,基本不改变泥岩等非储层的声波时差,

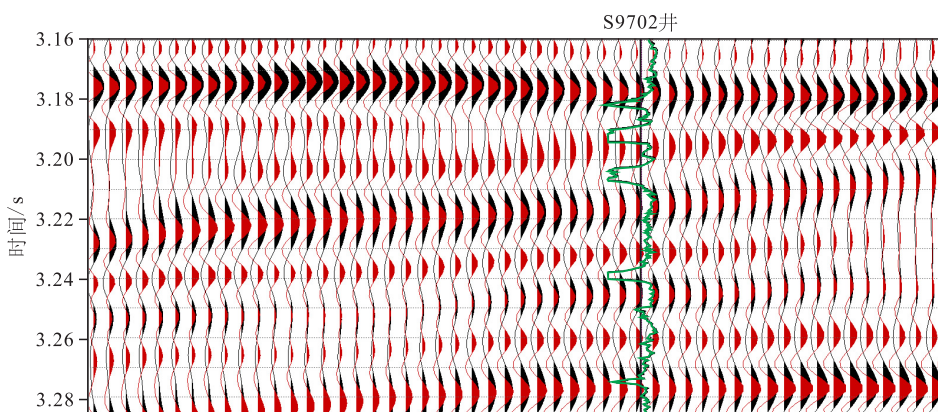


图4 原始地震剖面与地震双极性变换剖面叠合对比

Fig.4 Comparison between original seismic section and seismic bipolarity transform section through superimposition

重构的声波时差与原始声波时差整体保持一致,曲线低频特征明显。首先利用泥岩基线归一化自然电位曲线重构声波时差,除砂岩声波时差改变外其他基本不变,其次建立泥质砂岩、砂质泥岩等岩性段自然伽马与声波时差的统计关系式,重构其声波时差。具体实现步骤为:①单井岩性解释。②自然电位曲线的泥岩基线校正和归一化处理。③声波时差和归一化自然电位数据相乘得到重构声波时差曲线。④泥质砂岩、砂质泥岩等岩性段的自然伽马与声波时差数据拟合及声波时差重构。

2.2.2 测井约束反演

采用基于模型的测井约束稀疏脉冲反演方法,基于模型反演方法的优势是波阻抗模型和稀疏脉冲相对波阻抗道合并时频带范围容易控制。首先建立拟声波波阻抗模型,其次在波阻抗模型约束下,提取合适的正极性或负极性子波进行地震双极性变换的稀疏脉冲相对波阻抗反演,最后根据已钻井储层厚度、地震资料横向变化及地质认识选取波阻抗模型和稀疏脉冲相对波阻抗各自合适的频带范围进行频域道合并,并调试合适的色标。

以塔河油田桑塔木工区S9702井区为例,首先进行S9702井区双极性拟声波反演必要性分析。S9702井区石炭系卡拉沙依组CK1砂组钻遇2套含油气砂层,泥岩隔层较薄,第1套砂层具有中高波阻抗值,比下伏围岩的泥岩波阻抗值高,与上覆围岩波阻抗值相当,合成地震记录显示为中强波峰振幅,因储层靠近剥蚀区上覆地层屏蔽作用,该砂层顶界标定在原始地震剖面的弱波峰下 0° 相位位置,底界标定在最大波谷位置,振幅等地震属性不能准确反映该套砂层特征^[18]。第2套砂层上半部分为干层,具有高波阻抗值,下半部分油气层具有低波阻抗值,低于下伏围岩泥岩波阻抗值,合成地震记录

上为中强波峰振幅,标定在原始地震剖面的波谷偏下位置,为中强振幅。单极性子波反演只能突出1套砂层,双极性变换后2套砂层的顶界都标定在波谷位置,底界标定在波峰位置。以砂岩敏感性强的拟声波波阻抗模型作为低频约束,单极性子波地震反演显示2套砂岩储层为中高波阻抗值,泥质砂岩和砂质泥岩波阻抗值偏低,泥岩为低波阻抗值,增大了砂岩等储层与泥岩等非储层之间的波阻抗差值,更易于进行储层识别^[18]。

S9702井区CK1砂组薄储层原始地震单极性和基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波测井约束反演结果表明,新方法的分辨率高于地震单极性反演结果,对于地震单极性反演不能识别的薄砂层地震双极性反演却能够较好地识别。厚度大于5 m砂层的反演结果与实钻井钻遇情况的吻合程度较高,吻合率达到90%;3~5 m砂层的反演结果与实钻井钻遇情况的吻合程度达到80%,基本满足开发要求;厚度小于3 m的部分砂层能反演出来,但厚度误差较大。反演结果与地震资料的相关性较好,井间内插痕迹不明显,砂体尖灭点清楚, S9702井CK1砂组第1套含油气砂层与上覆地层的剥蚀关系清楚,且消除了因地震资料屏蔽造成该砂层地震反射振幅变弱而不能识别的影响(图5,图6)。

S9702井区CK1砂组第2套含油气砂层(埋深为4 849~4 859 m)的最大波阻抗属性分布特征(图7)表明,该砂层河道形态清楚,且与物源来自北部的沉积规律相吻合。

3 结论

基于生物启发算法的地震双极性变换拟声波

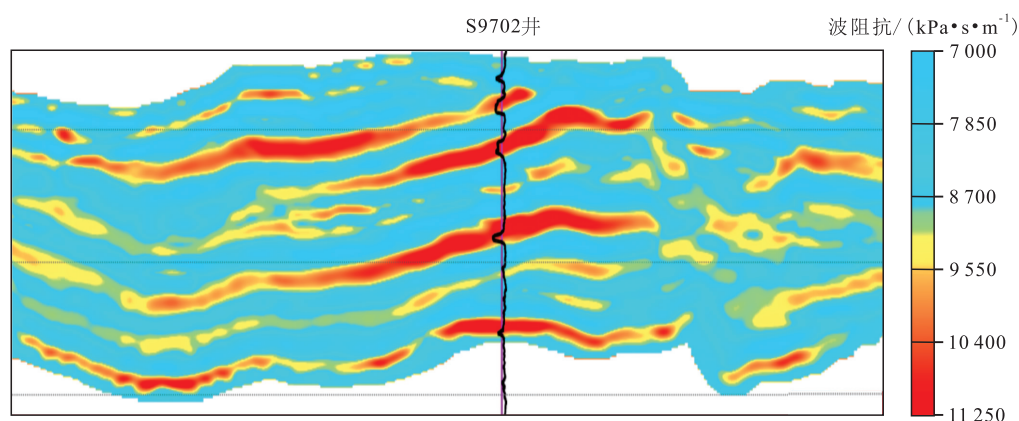


图5 过S9702井南北向地震双极性变换拟声波测井约束反演剖面

Fig.5 Inversion section for north-south seismic bipolarity transform with pseudo-acoustic wave as log constraint cross Well S9702

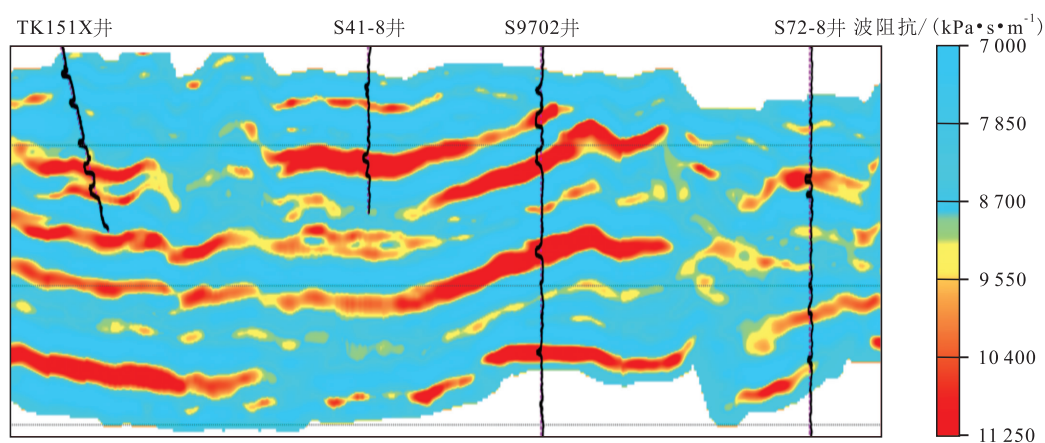


图6 过TK151X—S9702井北东向地震双极性变换拟声波测井约束反演剖面

Fig.6 Inversion section for north-east seismic bipolarity transform with pseudo-acoustic wave as log constraint cross Well TK151X-Well S9702

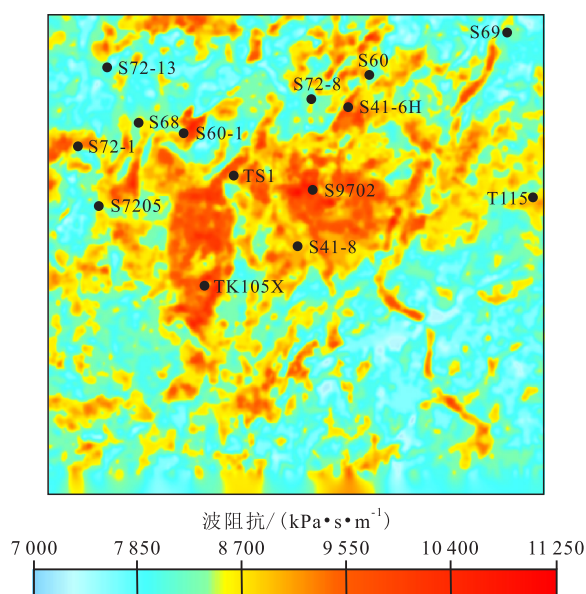


图7 S9702井区CK1砂组第2套含油气砂层波阻抗属性分布

Fig.7 Wave impedance attribute distribution of second group of oil and gas-bearing sand layers of CK1 sand formation in Well S9702 area

测井约束反演方法在塔河油田石炭系超深薄砂层预测的应用效果表明,对于振幅、频率等频谱类地震属性和常规地震反演方法不能满足储层预测精度要求的地区,新方法具有较强的适应性。地震双极性变换使大部分砂体统一标定在波峰或波谷位置,自然电位及自然伽马测井数据的拟声波重构提高了反演参数的储层敏感性,只需要较小的测井约束量即能对薄砂层进行反演,有利于降低反演结果的多解性,提高储层反演可信度。新方法在塔河油田S9702井区石炭系卡拉沙依组超深薄砂层的应用效果较好,反演结果显示滩坝及河道形态清楚且符合区域沉积规律。

参考文献

- [1] 钟大康,漆立新,云露,等.塔里木盆地塔河油田石炭系卡拉沙依组砂岩储层特征与物性控制因素[J].地球科学与环境学报, 2013,35(1):48-55.
ZHONG Dakang, QI Lixin, YUN Lu, et al. Reservoir characteristics and controlling factors on physical properties of sandstones in

- Kalashayi Formation of Carboniferous from Tahe Oilfield of Tarim Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35 (1): 48–55.
- [2] 樊怀阳, 陈文, 刘百春. 塔河油田卡拉沙依组砂组沉积相与储层研究[J]. 新疆地质, 2004, 22(4): 417–421.
FAN Huaiyang, CHEN Wen, LIU Baichun. Kalashayi Formation reserve and comprehensive evaluation in Tahe Oil Field [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(4): 417–421.
- [3] 徐向华, 杨勇, 别爱芳. 塔河油田石炭系三角洲微地震相研究[J]. 石油物探, 2007, 46(1): 32–35.
XU Xianghua, YANG Yong, BIE Aifang. Analysis of micro-seismic facies in delta of Carboniferous Formation at Tahe Oilfield [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(1): 32–35.
- [4] 张红贞, 孟恩. 测井曲线重构和频谱分析技术在塔里木盆地塔河油田卡拉沙依组储层预测中的应用[J]. 现代地质, 2009, 23 (5): 947–951.
ZHANG Hongzhen, MENG En. Application of spectrum analysis and reconstructive logs technique in the reservoir prediction in Kalashayi Formation of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Geoscience, 2009, 23(5): 947–951.
- [5] 朱云龙, 陈瀚宁, 申海. 生物启发计算: 个体、群体、群落演化模型与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
ZHU Yunlong, CHEN Hanning, SHEN Hai. Bio-inspired computing: individual, swarm and community evolution models and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [6] 赵海涛, 刘艳, 魏国庆, 等. 曲线重构反演在轮南石炭系薄层预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2): 154–157.
ZHAO Haitao, LIU Yan, WEI Guoqing, et al. Application of curve reconfiguration inversion in the prediction of the thin Carboniferous Formations in Lunnan area [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(2): 154–157.
- [7] 李斌, 杨迎春, 何玉萍, 等. 塔河油田卡拉沙依组地震沉积学研究及储层预测[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1 107–1 112.
LI Bin, YANG Yingchun, HE Yuping, et al. The application of seismic sedimentology and reservoir prediction of Karratha Formation in the Tahe Oilfield [J]. Geoscience, 2009, 23 (6): 1 107–1 112.
- [8] 张建芝, 李谋杰, 张云银, 等. 灰质背景下浊积岩储层地震响应特征及识别方法——以东营凹陷坨71井区为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(6): 70–79.
ZHANG Jianzhi, LI Moujie, ZHANG Yunyin, et al. Seismic response characteristics and identification methods of turbidite reservoir in limestone background: a case study of Well Tuo71 area in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 70–79.
- [9] 杨广广, 宁松华, 沈炜. K1区块石炭系卡拉沙依组储层预测[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 103–107.
YANG Guangguang, NING Songhua, SHEN Wei. Reservoir prediction of Carboniferous Kalashayi Groupin K1 block [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(1): 103–107.
- [10] 陈刚. 导航金字塔分解技术在储层地震预测中的应用研究[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 125–131.
CHEN Gang. Application of steerable pyramid decomposition technology in reservoir seismic prediction [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 125–131.
- [11] 季玉新, 刘春园, 陈冬, 等. 分频反演方法及其在塔河A区储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 38–42.
JI Yuxin, LIU Chunyuan, CHEN Dong, et al. Frequency-divided inversion and its application to reservoir prediction in block A of Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 38–42.
- [12] 史长林, 魏莉, 张剑, 等. 基于机器学习的储层预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 90–97.
SHI Changlin, WEI Li, ZHANG Jian, et al. Reservoir prediction method based on machine learning [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 90–97.
- [13] 黄美玲. 蚁群优化算法的研究及其应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
HUANG Meiling. Research and application of the ant colony optimization [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [14] 林承灏, 郭立全, 张卫, 等. 利用蚂蚁追踪技术精细解释矿井地质构造[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(4): 55–59.
LIN Chenghao, GUO Lique, ZHANG Wei, et al. Fine interpretation of mine geological structure through ant tracking technology [J]. Coal Geology of China, 2013, 25(4): 55–59.
- [15] 陈敬义, 徐巧玲, 赵荣建, 等. 生物启发计算地层圈闭油气藏超剥线识别方法: ZL201610727136.1 [P]. 2017–09–29.
CHEN Jingyi, XU Qiaoling, ZHAO Rongjian, et al. Identification method of over stripping line of stratigraphic trap oil and gas reservoir by bio-inspired calculation: ZL201610727136.1 [P]. 2017–09–29.
- [16] 李松, 刘力军, 翟曼. 改进粒子群算法优化BP神经网络的短时交通流预测[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9): 2 045–2 049.
LI Song, LIU Lijun, ZHAI man. Prediction for short-term traffic flow based on modified PSO optimized BP neural network [J]. System Engineering Theory and Practice, 2012, 32(9): 2 045–2 049.
- [17] 刘玲, 王琳霖, 吴疆, 等. 鄂尔多斯盆地南部彬长区块上石盒子组7段储层识别与预测[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1 124–1 135.
LIU Ling, WANG Linlin, WU Jiang, et al. Reservoir identification and prediction of He7 member in Binchang block, southern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1 124–1 135.
- [18] 彭旋, 李佳, 孔令辉, 等. 地震属性特征分析方法在储层沉积研究中的应用[J]. 广东石油化工学院学报, 2020, 30(1): 31–34.
PENG Xuan, LI Jia, KONG Linghui, et al. Application of seismic attribute characteristic analysis method to reservoir sedimentary research [J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2020, 30(1): 31–34.

编辑 邹澍滢