

利用岩性阻抗识别砂岩、泥岩以及砂体叠置 ——以北部湾盆地涠洲A油田为例

彭军, 周家雄, 隋波, 李海鹏, 唐蓓

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司)

摘要 针对涠洲A油田储层平面非均质性强、存在砂体叠置,以及单纯的波阻抗反演不能十分有效地识别砂泥岩和叠置砂体,提出了将纵波阻抗与横波阻抗通过一定的数学变换获得岩性阻抗的方法,证实了该岩性阻抗反演结果与实钻井吻合程度高,有效区分了砂岩和泥岩,并成功地预测了涠洲A油田砂体叠置的关系。

关键词 波阻抗反演; 岩性阻抗; 砂体预测; 储层预测; 涠西南凹陷; 北部湾盆地

中图分类号: TE122.4⁴

文献标识码: A

随着油气勘探的推进和计算机技术水平的提高,近年来地震资料反演技术得到了迅速发展,出现了多种反演软件和反演方法。反演技术与沉积相、层序地层、油藏地质研究紧密结合,已经成为油藏精细描述与储层预测的有效方法,并且也成了识别岩性油气藏最有效的方法之一^[1-5],它们在石油勘探和开发生产中发挥了十分重要的作用^[6]。

地震资料反演根据采用的地震资料可以分为叠前反演和叠后反演。其中,叠后反演采用的是叠后地震资料,在地质、测井等资料标定的基础之上,可提取与地震波动力学、运动学相关的参数来反映岩层性质,进而预测地下储层空间分布^[7-9],但由于叠后地震资料反演所包含的地球物理信息相对有限,故在预测储层时存在一定的局限性;而叠前地震资料反演是目前勘探研究领域较为新颖的技术^[10],因为叠前地震资料包含振幅随偏移距或入射角增大而变化的特征,所以能够提供更多的反映储层纵横向变化的地球物理参数^[11],并且可以利用多种弹性参数分析结果来获得较叠后地震反演可信度更高的成果。但是,由于地质情况的复杂性,单纯的波阻抗反演有时并不能有效地识别砂泥和叠置砂体,为解决此类问题,本文提出了将纵波阻抗与横波阻抗通过一定的数学变换来获得一种岩性阻抗的方法,并通

过在南海北部湾涠洲A油田的应用,表明该方法能很好地区分砂岩和泥岩,还能有效地区分互相叠置的不同砂体。

1 问题的提出

涠洲A油田位于南海北部湾盆地涠西南凹陷中部,油田的油藏类型较为复杂,既有构造油藏,也有构造—岩性复合油藏。该油田主要储层位于自下而上的古近系流沙港组、涠洲组和新近系角尾组之中。其中,流沙港组是主要生产层位,其储层横向变化比较复杂、连通性差,总体表现为平面非均质性强的特征^[12]。

通过井点的分析,认识到砂体存在明显叠置的现象,但是它们在地震剖面上的同相轴却表现为较好的连续性,从而无法识别出这种叠置情况,由此造成了该油田存在油水界面矛盾、注水效果不理想等问题。为了解决油田存在的这些问题,迫切需要对储层进行精细刻画,特别是对砂体边缘的这种叠置接触关系进行细致刻画。在仅仅使用纯波地震资料可能无法满足这种要求的情况下,则需要综合运用地质、地震和钻井等多种信息,以达到对砂体的精细研究。

为了识别区分出砂岩和泥岩,一般常用的方法是

收稿日期: 2015-01-09; 改回日期: 2016-05-31

本文受中国海洋石油总公司“十二五”重大专项“南海西部海域典型低孔低渗油气藏勘探开发关键技术研究及实践”(编号:CNOOC-KJ125ZDXM07LTD02ZJ11)资助

彭军: 1984年生,工程师,现从事地球物理技术在储层描述中的应用工作。通讯地址: 524057 广东省湛江市坡头区南油二区商业附楼5楼; E-mail: pengjun@cnooc.com.cn

首先利用相对较为简单的叠后地震资料反演,然而,通过对油田钻井的测井曲线归一化进而进行岩性敏感参数分析后,发现在纵波阻抗(Z_p)与测井伽马值(GR)的交会图上(图1a)泥岩与砂岩的阻抗值区域重叠,不能有效区分砂岩和泥岩。因而采用叠后地震纵波反演得到的纵波阻抗体也不可能有效区分砂岩和泥岩。再看用横波阻抗(Z_s)和纵波速度/横波速度(V_p/V_s)分别与测井伽马值(GR)的交会分析(图1b,图1c),发现 Z_s 与 V_p/V_s 也不能很好地区分砂岩和泥岩,这表明叠前反演在该区也不是预测储层的有效方法。由此看来,单独使用一种岩石物理参数来识别砂岩和泥岩是困难的。由于砂岩和泥岩的纵波阻抗、横波阻抗、 V_p/V_s 均存在严重的交织现象,因此,都不能单独用来区分砂岩和泥岩,至于要识别叠置的砂体则更加不可行。

2 岩性阻抗的概念

由上述分析可知,涠洲A油田利用单一岩石物理参数不能有效地区分砂岩和泥岩,那么同时采用纵波阻抗与横波阻抗两种岩石物理参数来识别砂岩和泥岩是不是有效呢?通过对纵波阻抗与横波阻抗的交会图(图2a)分析,发现砂岩与泥岩在每个坐标轴方向上均有较多交叉重叠^[13-15],但从交会图中也可以明显地发现砂岩处在交会图中红线的上方,因此若通过适当的坐标变换,就可以有效地区分砂岩和泥岩,以达到储层识别的目的。将横波阻抗(Z_s)与纵波阻抗(Z_p)交会坐标系旋转 θ 角度,即由黑色坐标系变为红色坐标系(图2a),红色虚线方向用PI表示,则PI可由公式(1)表示:

$$PI = Z_s \cdot \cos\theta - Z_p \cdot \sin\theta \quad (1)$$

式中:PI为岩性阻抗, Z_s 为横波阻抗, Z_p 为纵波阻抗,三者的单位都是 $\text{kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$, θ 为区分砂岩和泥岩的红线与横坐标纵波阻抗轴的夹角,如图2a所示。将垂直PI的坐标轴定义为垂直岩性阻抗分量VPI。

从岩性阻抗(PI)与垂直岩性阻抗分量(VPI)交会图(图2b)中可明显发现,若取红线处的波阻抗(PI)为门限值,那么砂岩将主要集中在门限值的左边,泥岩则位于门限值的右边。由于换算后得到的该PI参数可有效区分砂泥岩,因此将该岩性参数称为岩性阻抗。依据岩性阻抗的定义公式(1)可知,岩性

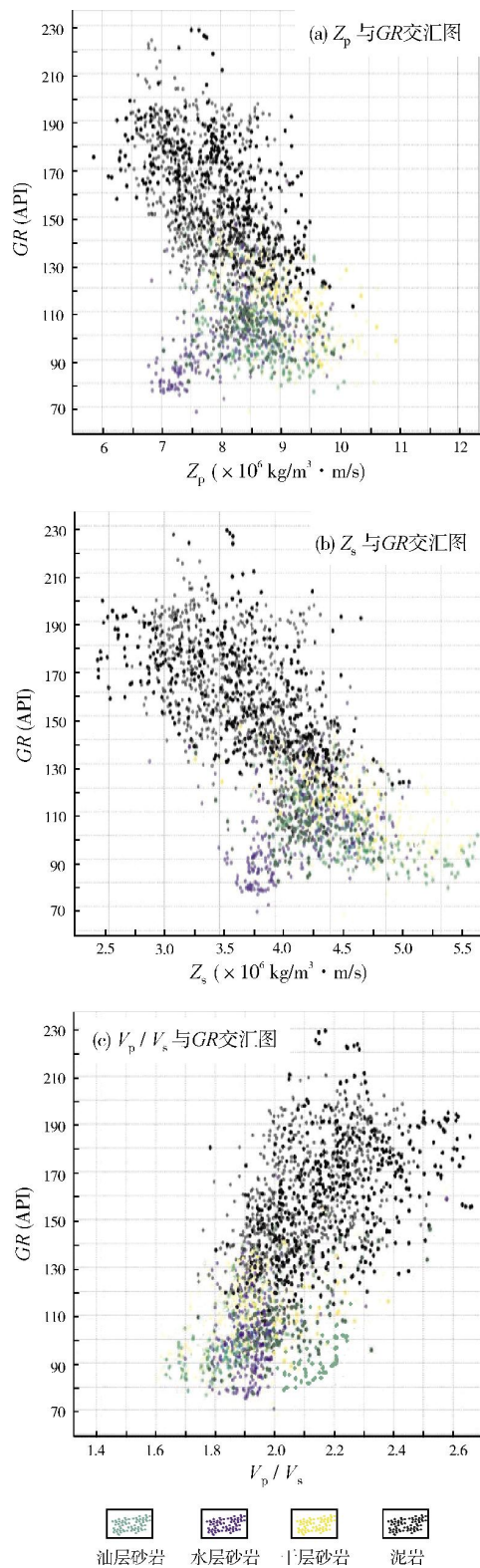


图1 涠洲A油田多井纵波阻抗(Z_p)、横波阻抗(Z_s)、 V_p/V_s 与测井伽马值(GR)交会图

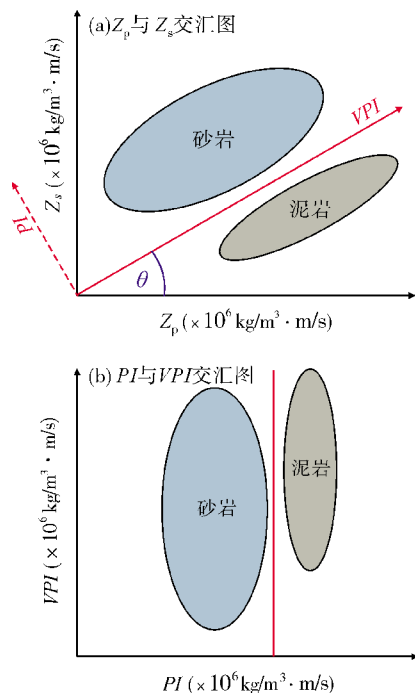


图2 岩性阻抗定义示意图

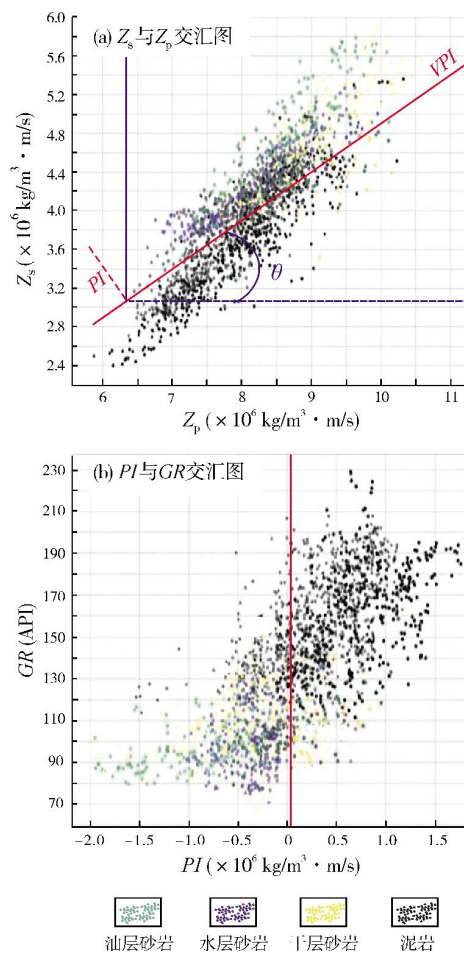
阻抗是纵波阻抗与横波阻抗的综合反映,它不仅反映了岩性纵波阻抗的差异,而且还对岩性流体与骨架孔隙有一定程度的响应。岩性阻抗相比于纵波阻抗或横波阻抗这些单一波阻抗来说,其反演结果是更多的岩石物理参数的综合反映,它突出表现了砂泥岩的物性参数差异,能够对砂泥岩进行更细致的区分,甚至当不同砂体之间由于泥质含量不同时,岩性阻抗也可能有较大差别,这将有助于对叠置砂体的刻画。

3 岩性阻抗的应用

对涠洲A油田的纵波阻抗(Z_p)、横波阻抗(Z_s)进行交会分析(图3a),可以看出该区使用岩性阻抗(PI)能够区分出砂泥岩。通过将计算出的岩性阻抗(PI)与测井伽马值(GR)交会,从图3b来看,证实了岩性阻抗区分砂泥岩的有效性。

但是研究区的砂体识别不仅仅是要解决砂岩和泥岩之间的区别,同时还要判断砂体之间的叠置关系。前已述及,地震纯波数据不能有效地区分这种叠置,那么岩性阻抗体能否有效区分同一时期沉积的不同砂体呢?首先对测井数据进行分析:虽然该区在地震同相轴上表现得十分连续,但实钻2井

与3井却分别钻遇了流沙港组一段一油组(L_1I)不同的油水界面,且两井之间不存在明显断层迹象;测井解释的泥质含量也明显不同,表明两井钻遇的砂体不是同一砂体。将两井钻遇的同一时期不同砂体的测井岩性阻抗进行交会分析,2井与3井钻遇的 L_1I 砂体岩性阻抗数据点在交会图中分别使用正方形、三角形表示(图4),从图4中可以十分明显地发现:2井钻遇的 L_1I 油组砂体岩性阻抗与3井钻遇的 L_1I 油组砂体岩性阻抗有明显差别。2井的岩性阻抗主要位于图4红线的左侧,3井的岩性阻抗主要位于红线的右侧。因此,涠洲A油田实钻井岩性阻抗交会图证实,岩性阻抗可有效区分该油田叠置的砂体。利用岩性阻抗这种识别砂体叠置的能力,可以有效地进行砂体精细刻画研究,实现对单砂体的空间展布刻画。

图3 涠洲A油田纵波阻抗(Z_p)—横波阻抗(Z_s)交会图与岩性阻抗(PI)—测井伽马值(GR)交会图

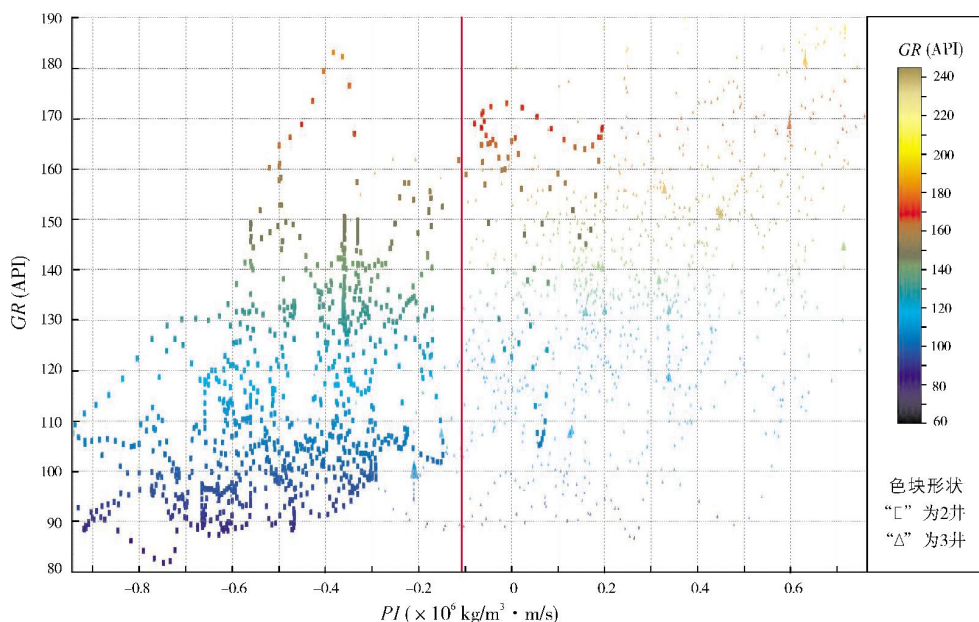


图4 涪洲A油田2井与3井流沙港组一段一油组岩性阻抗(PI)—测井伽马值(GR)交会图

本次研究还将岩性阻抗应用在涪洲A油田其它油组,以进行砂体叠置情况研究与预测。通过叠前反演,得到可信的纵波阻抗体与横波阻抗体,再采用岩性阻抗计算公式(1)可以得到研究区的岩性阻抗体。为确认反演结果的可靠性,将井点数据与反

演结果进行对比(图5)。图上的2井、3井、A11井为参加反演的井,4井、A2井是未参与反演的井。从过这些井的岩性阻抗连井剖面来看,该区得到的岩性阻抗体与井点数据十分吻合,说明反演结果精度较高,可用于储层预测及砂体的精细雕刻。

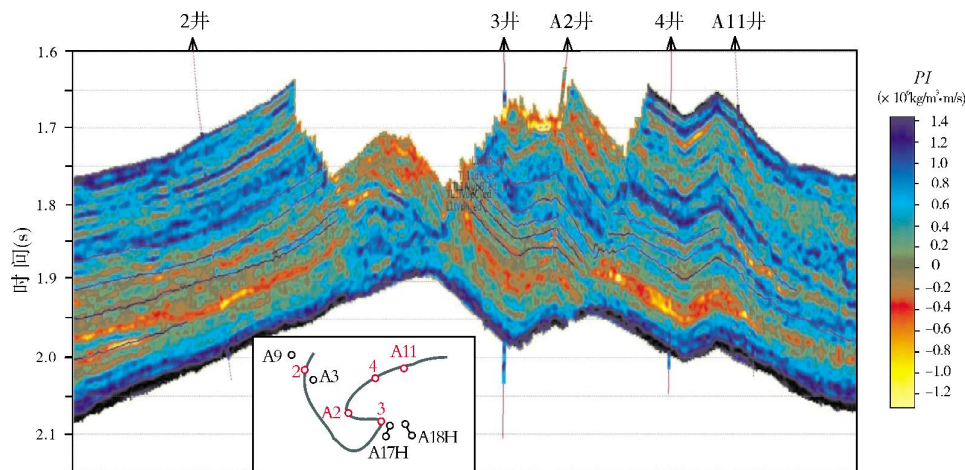


图5 涪洲A油田岩性阻抗连井剖面

在对涪洲A油田的流沙港组一段四油组(L₁IV)砂体实施调整井以提高采收率时,采用了岩性阻抗来研究该区砂体是否有叠置的可能性,以避免可能存在的风险。从地震纯波剖面上来看(图6a),该区目的层(图上解释的蓝色反射层)地震同相轴连续性好,但是从岩性阻抗剖面上来看(图6b,图中

蓝色层位为地震纯波反射剖面上解释的结果),岩性阻抗同相轴不支持地震纯波解释结果,因为在绿线与红线相接处的岩性阻抗出现明显的分隔、截断现象。沿L₁IV油组提取该区的岩性阻抗属性切片(见图7)可以看到:A2井与3井之间岩性阻抗的差别十分明显:A2井以西,岩性阻抗值一般小于

$-0.35 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$, 图中显示以红色、黄色、青色为主; A2井以东岩性阻抗值在图中主要为蓝色到灰色。根据前述2井与3井的L₁ I 油组砂体岩性阻抗交会图(图4), 岩性阻抗在涠洲A油田具有区分单

砂体的能力, 因此, A2井东西两侧如此明显的岩性阻抗差异, 是否表明L₁IV油组砂体也存在砂体边缘叠置现象呢? 为了搞清这一点, 下面结合井点信息进行分析。

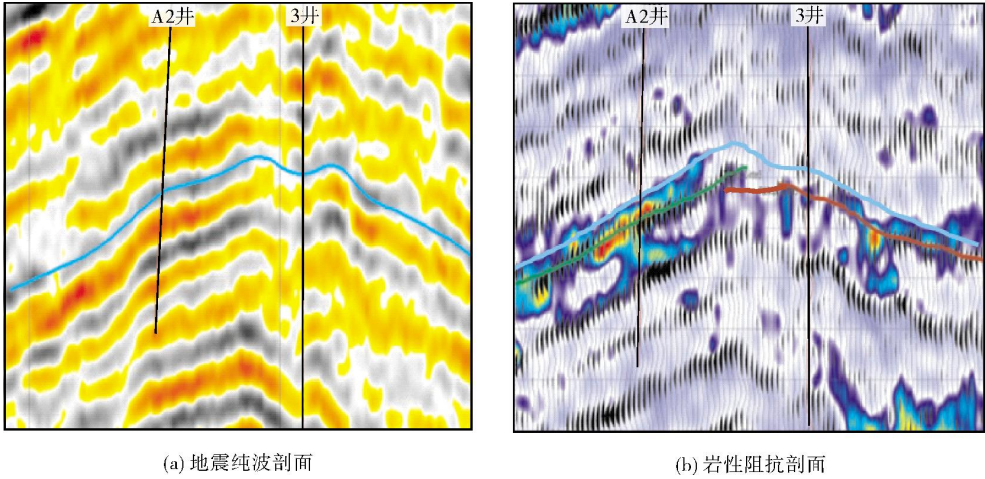


图6 涠洲A油田地震纯波剖面与岩性阻抗剖面对比
井位见图5

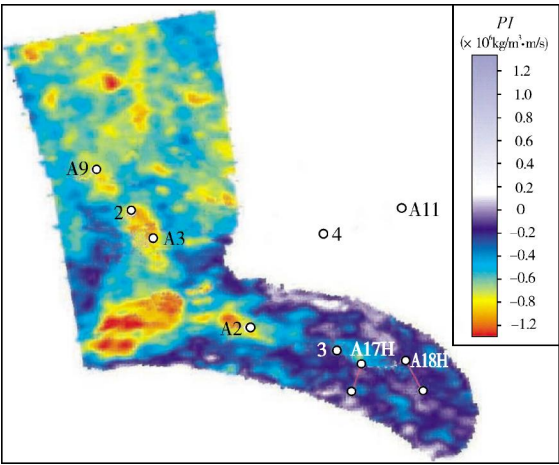


图7 涠洲A油田沿流沙港组一段四油组岩性阻抗属性切片

从井点统计信息(表1,图7)分析可知:位于A2井及其以西的A3井、2井、A9井, 它们的泥质含量都小于8%, 砂体厚度均大于17 m, 砂体净毛比都低于60%;位于A2井以东的3井、A17H井的泥质含量都超过10%, 砂体厚度10 m左右, 但是净毛比却高达85.26%。A9井到A2井的距离约为A2井到3井距离的3倍, 从A9井到A2井泥质含量基本不变, 净毛比变化也较小, 而3井的泥质含量比A2井泥质含量的两倍还高, 并且净毛比提高了30%以上。显然A2井以东与

A2井以西, 钻井钻遇的砂体表现出不同的物性特征。这在沿层(L₁IV)岩性阻抗属性切片上(图7)也可以看出。基于井点与岩性阻抗的对应关系分析(表1, 图7), 在岩性阻抗值小于 $-0.35 \times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ 的红、黄、青色的范围是砂体泥质含量低、砂体相对较厚的区域。因此认为L₁IV油组砂体极有可能是A2井以西的砂体与A2井以东的砂体这两个砂体的互相叠置。

表1 涠洲A油田井点砂体信息统计

井名	砂体净厚 (m)	泥质含量 (%)	净毛比 (%)	岩性阻抗 ($\times 10^6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$)
A9	30	4.07	49.93	-0.78
2	51	7.15	57.73	-0.83
A3	22	4.75	59.16	-0.80
A2	17.03	4.03	48.21	-0.81
3	10.39	12.75	85.26	-0.33
A17H*	—	15.00	—	-0.11

* A17H井为水平井, 岩性阻抗采用沿井轨迹平均获得

在生产调整井实施中, 曾在A17H井以东钻了A18H井。A18H井钻遇L₁IV油组砂体的位置要高于该砂体钻遇的油水界面, 但是A18H的这个砂体出水, 这也证明了L₁IV油组砂体在2井区与3井区为同一个砂体的认识是不正确的, L₁IV油组砂体应该是2井区与3井区两个单砂体间的叠置, 只是由于砂体间

阻抗差异较小,这才在地震资料上不能明显地表现出反射差异。

通过岩性阻抗在涪洲A油田对L₁IV油组叠置砂体的有效刻画,充分说明了岩性阻抗反演结果识别单砂体的有效性,这为将来的井位调整提供了极好的技术性支持。

4 结束语

在进行储层预测时,由于常常受限于地震资料的品质,故而单砂体的刻画是十分困难的,而且,单纯地使用一种岩性参数也不能有效地区分砂岩和泥岩,为此需要结合多种岩性参数进行分析。岩性阻抗就是综合运用纵波阻抗与横波阻抗,通过适当的公式变换来采用多种岩性参数以增强对储层识别的一种岩性属性。岩性阻抗不仅能有效地识别砂泥岩,为储层预测提供很好的参考依据,而且岩性阻抗还能较好地地区分砂体之间的叠置关系,为刻画单砂体的研究提供支撑。这一方法对勘探和开发都具有实用意义,具有较好的推广价值。

参考文献

- [1] 曹孟起,王九栓,邵林海. 叠前弹性波阻抗反演技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(3): 323-326.
- [2] 孟阳. 基于匹配追踪时—频分解技术的辫状河道油藏储层预测[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 104-110.
- [3] 吴海波,吴河勇,张阳,等. 地震波阻抗反演方法之改进与三阶段、九步骤反演方法的初步实践[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 928-932.
- [4] 张文宾,姜传金. 松辽盆地北部兴城地区营城组一段火山岩储层的地震预测[J]. 现代地质, 2005, 19(增刊 1): 278-281.
- [5] 袁井菊,万晓迅,陈明. 中东地区鲁卜哈利盆地古生界地震反射构型特征与储层预测[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 940-946.
- [6] 尹太举,张昌民,赵红静. 地质综合法预测剩余油[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 539-544.
- [7] 郭太现,赵春明. 基于地震信息的歧口 18-1 稀井网区储层预测[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 703-709.
- [8] 谭俊敏. 埕南地区砂砾岩扇体储层的预测及效果[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(3): 310-313.
- [9] 关达. 大牛地气田 D 区块山 1 段三维地震储层预测[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(1): 44-47.
- [10] 李凌高,甘利灯,杜文辉,等. 叠前地震反演在苏里格气田储层识别和含气性检测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 261-265.
- [11] 李桂梅. 叠前地震反演预测民丰地区沙四段盐下砂砾岩体含油气性[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(2): 52-54.
- [12] 方小宇,姜平,欧振能,等. 融合地质建模与地震反演技术提高储层预测精度的新方法及其应用——以涪洲 11-1N 油田为例[J]. 中国海上油气, 2012, 24(2): 23-26.
- [13] Quakenbush M, Shang B, Tuttle C. Poisson impedance [J]. The Leading Edge, 2006, 25(2): 128-138.
- [14] 解吉高,刘志斌,张益明,等. 利用泊松阻抗进行油气检测[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 273-278, 316.
- [15] 姚云霞,刘江,张雷. 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, 2011, 23(6): 377-379, 386.

编辑:黄革萍

Identification of Superimposed Sandbody by Using Lithology Impedance in Weizhou-A Oilfield, Beibuwan Basin

Peng Jun, Zhou Jiaxiong, Sui Bo, Li Haipeng, Tang Xu

Abstract: In view of the plane heterogeneity of reservoirs and the superimposition of sand body in Weizhou-A Oilfield, Beibuwan Basin, the well data analysis shows that the simple impedance inversion can't identify sand-mudstone and superimposed sandbody effectively. The lithology impedance was presented in this study by using mathematical transformation method of the P-wave impedance and S-wave impedance. It is proved that the results of lithology impedance are in high coincidence with drilling. The sandstone and mudstone are identified effectively, and the superimposed relationship of sandbody was predicted successfully by using lithology impedance.

Key words: Impedance inversion; Lithology impedance; Sandbody prediction; Reservoir prediction; Southwest Weizhou Depression; Beibuwan Basin

Peng Jun: Geophysical Engineer. Add: Zhanjiang Petroleum Institute, Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524057, China