

基于地震叠后反演与属性分析的页岩气有利储层预测

周惠^{1,2}, 田玉昆^{3*}, 李娟^{1,2}, 孔丽云^{1,2}
ZHOU Hui^{1,2}, TIAN Yukun^{3*}, LI Juan^{1,2}, KONG Liyun^{1,2}

1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083;
 2. 中国地质调查局非常规油气地质重点实验室, 北京 100083;
 3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055
1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;
2. The Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Geology, China Geological Survey, Beijing 100083, China;
3. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China

摘要:中国南方页岩气勘查区块多为勘探新区,仅部署少量二维地震和地质钻井,且资料品质普遍较差,页岩气储层预测很难像成熟勘探区一样开展系统性研究工作,如何对现有数据进行充分挖掘是解决勘探新区页岩气储层预测的关键。为此,综合利用不依赖初始模型的叠后约束稀疏脉冲反演方法和多种频率类属性分析技术,开展页岩气有利储层预测。地震反演能够获得多种参数参与储层预测,属性分析能够从多种角度识别储层,通过多种信息综合应用和叠合分析以提高储层预测精确性和有效性,为新区页岩气勘探提供了一种新的思路。该项技术应用于南方某区块,圈定了页岩气的有利目标区,在该区部署的两口水平井均获得高产工业气流。

关键词:地震叠后反演;地震属性;页岩气;储层预测

中图分类号:P631.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)04-0557-08

Zhou H, Tian Y K, Li J, Kong L Y. Prediction of favorable reservoir for shale gas based on seismic post-stack inversion and attribute analysis. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 557-564

Abstract: Most shale gas exploration blocks in South China are new exploration areas, only a small number of 2D seismic and geological drilling are deployed there, and the data quality is generally poor. Therefore, it is difficult to carry out systematic research on shale gas reservoir prediction like mature exploration areas. How to fully use the only data is the key to predicting the shale gas reservoir in the new exploration area. The post stack constrained sparse pulse inversion method independent of the initial model and a variety of frequency attribute analysis techniques were used to predict favorable shale gas reservoir. Seismic inversion can make full use of a variety of information parameters to participate in reservoir prediction, and attribute analysis can identify reservoirs from multiple angles. In addition, comprehensive application of multiple information and superposition analysis can improve the accuracy and effectiveness of reservoir prediction, which provides a new idea for shale gas exploration in new exploration area. The technology was applied to a block in South China, and the favorable target of shale gas was delineated. The two horizontal wells deployed in the area obtained high-yield industrial gas flow.

Key words: seismic post-stack inversion; seismic attributes; shale gas; reservoir prediction

收稿日期:2020-03-06;修订日期:2020-11-16

资助项目:国家重点研发计划《重磁电采集与资料处理》(编号:2016YFC060110204)、中国地质调查局项目《油气资源战略选区调查与评价技术要求制定》(编号:DD20160094-1)、国家自然科学基金项目《基于裂缝-孔隙介质建模的储层参数预测和流体识别方法研究》(批准号:41774146)

作者简介:周惠(1983-),女,硕士,高级工程师,从事地震资料处理、储层预测研究和技术标准研制工作。E-mail:zhouhui1125@163.com

*通信作者:田玉昆(1984-),男,博士,高级工程师,从事地震资料采集、处理和反演研究。E-mail:tianyukun@ogs-cgs.cn

近年来,页岩气勘探开发成为全球能源勘探的热点^[1-2]。与常规油气不同,页岩气的形成与分布独具特色,往往分布在盆地内厚度较大、分布较广的有效烃源岩层中^[3-4],是一种相对具有连续性的气藏,但连续分布的页岩内部并非均质,受区域上岩相变化的影响,页岩气藏在纵、横向上的非均质性较强,造成页岩储层质量不一,仅局部存在相对富集的“甜点区”^[5],这对页岩气有利储层预测提出了挑战。而且,中国页岩气勘查区块多数为勘探新区,地质条件复杂,资料有限,仅部署少量二维地震和地质钻井,且地震资料品质较差,以往更多的是根据地质家的经验和认识,辅以有限的地震解释结果及钻井数据开展储层预测,预测有效性较低,因此如何利用好有限的二维地震资料寻找有利页岩气储层成为中国页岩气勘探开发亟待解决的问题^[6-8]。

基于地震资料开展储层预测,在常规油气勘探中已基本形成一套较成熟的技术组合,主要包括地震反演、属性提取、频谱成像等技术。地震反演可将常规地震界面型的振幅—时间域数据反演成岩层型时间域或深度域的声波阻抗数据,方便地质工作者开展储层解释^[9-10]。其中稀疏脉冲反演能够直接从地震信息中提取反射信息,不依赖初始模型,适用于钻井数较少、地震资料分辨率低的区域,能获得宽频带的反射系数,使反演得到的波阻抗模型更趋于真实,在勘探新区应用较广^[11-14]。基于不同地质构造背景的不同储层在孔隙结构、储层物性及含流体性方面存在差异,这些差异会形成不同的地震属性特征,成为利用地震属性进行储层预测及流体识别的依据^[15-17]。除常规属性外,相干体、谱分解、流体活动性属性等技术也相继出现,为常规、非常规油气储集层预测和流体识别提供了新的技术手段^[18-23]。

不同地质体在各种地球物理场上的表现形式会有不同,因而用不同的地球物理方法对其特征进行描述,利用多种信息共同识别一种地质现象,会有效提高识别的准确性,减少多解性^[24-25]。基于此,本文结合页岩气勘查区块现状及资料特点,借鉴常规油气勘探储层预测技术,在勘探新区,探索应用二维地震叠后约束稀疏脉冲反演和地震频率类属性综合分析技术,充分挖掘地震资料内隐藏的与页岩气储层相关的异常信息,开展页岩气有利储层预测,该结果应用于南方某勘探新区,取得了较好的效果。

1 方法技术

针对页岩气勘探区地震和钻井较少,地震资料品质普遍较差的特点,选择了约束稀疏脉冲反演和流体属性、高亮体属性、油气检测属性等多属性分析技术,按照先找储层再判别含气性的研究思路,总结出了一套利用地震反演和多属性分析技术综合预测页岩气有利储层的方法,主要技术流程参见图1。

1.1 约束稀疏脉冲波阻抗反演

约束稀疏脉冲反演(Constrained Sparse Spike Inversion, CSSI)是基于脉冲反褶积的一种递推地震波阻抗反演方法,其基本假设是地层的反射系数序列是由一系列稀疏且不连续的大反射系数和呈高斯分布的小反射系数叠合而成,大反射系数代表地下不连续界面或岩性分界面^[26-27]。反演过程是从地震道中根据稀疏的原则提取反射系数,与子波褶积后生成合成地震记录;利用合成地震记录与原始地震道残差的大小修改参与褶积的反射系数个数,再生成合成地震记录,经多次迭代,最终得到一个能最佳逼近原始地震道的反射系数序列。该方法不依赖初始模型,直接由地震记录计算反射系数,实现递推反演,同时用地震解释层位和井约束控制波阻抗的趋势和幅值范围,一方面能够获得宽频带的反射系数,另一方面也能够较好地解决地震记录多解性问题,从而得到更趋于真实的波阻抗模型,适合井较少或无钻井资料的地区^[28-30]。

由于约束稀疏脉冲反演是在地震频带范围进行波阻抗反演,因此反演结果缺少低频信息,需要

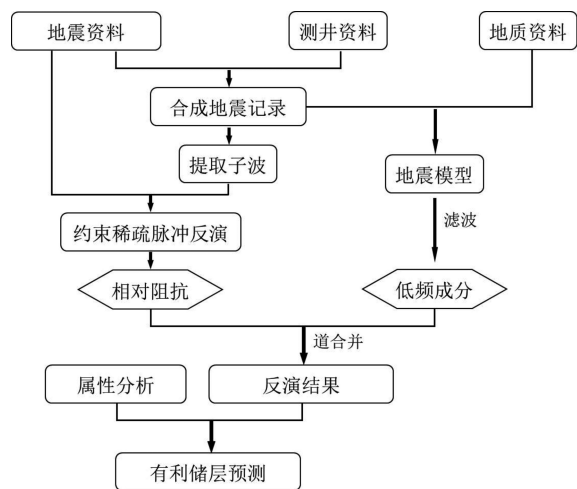


图1 储层预测技术流程图

Fig. 1 Flow chart of reservoir prediction technology

利用测井曲线的低频信息进行补偿。首先将参与反演的测井数据内插得到一个阻抗体,并设计低通滤波器对测井曲线进行滤波,将滤波后的结果与约束稀疏脉冲反演结果合并,最终获得一个全频带的绝对波阻抗数据体。

1.2 属性分析

地震波在地下传播过程中会发生能量衰减,高频被吸收,尤其在聚集了石油、天然气的储层中传播时,高频被吸收更明显,因此频率类属性被广泛应用于含油气储层识别。近年基于频谱分解的低频伴影、流体活动性、高亮体、油气检测等频率类属性技术为储层预测及流体识别提供了新的手段,在致密气藏储层描述中得到广泛应用^[21-22]。

(1) 流体活动性属性

流体活动性是低频或者高频部分振幅谱的斜率。实质上反映的是地震资料中渗透性储集层与非渗透性储集层频率的变化率(图2)。低频段频谱中渗透性储集层与非渗透性储集层的频率变化率表现为正异常,而在高频段频谱中频率变化率表现为负异常。利用地震资料中渗透性储集层与非渗透性储集层频谱的变化率可以获得流体活动性的变化量,进而开展储集层储集性能和地层流体变化研究。

(2) 高亮体属性分析

高亮体属性亦属于谱分解基础之上的时频域属性,频率域属性能去掉振幅影响,把频率域内特殊地质现象展示出来,结合钻井含气数据分析,可反映储层含气的变化,预测页岩气有利储层^[31]。高亮体属性将多个单一频率的分频体中的关键信息压缩为2个体:一是峰值频率体,一是峰值振幅减去谱平均振幅的数据体(相当于偏差),峰值与平均振幅之差,可指示储层和油气(图3)^[32]。

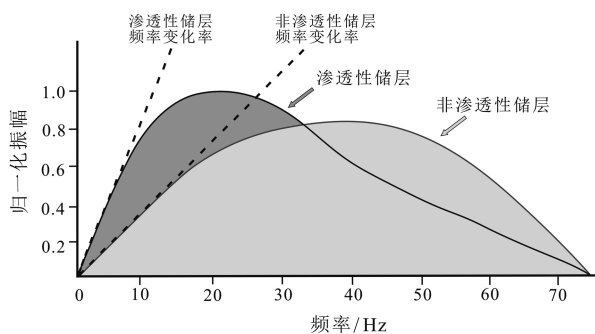


图2 流体活动性预测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fluid activity prediction

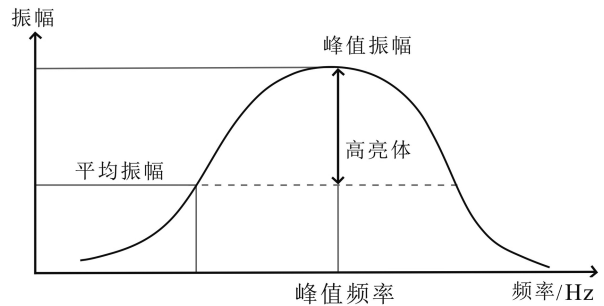


图3 高亮体原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of highlights

(3) DHAF 油气检测

DHAF 油气检测技术以 Biot 双相介质理论为基础,更接近实际含油气储层真实情况,相比原有单相介质理论为基础的油气检测方法,可降低检测结果的多解性和不确定性。当地震记录经过含油气的地层时,地震记录的低频段能量相对增强,而高频段能量相对减弱,称其为“低频共振、高频衰减”^[33-35]。

DHAF 油气检测分析运用共振滤波方法,在高低敏感频段内求取最大特征能量,计算储层的物性、含油气性等属性参数,检测结果能反映油气分布的非均质性。

2 关键技术应用效果

研究区在大地构造上位于扬子陆块北缘中段,地跨湘鄂西褶皱带和中扬子2个构造单元,主要目的层是寒武系牛蹄塘组。研究区已钻井4口(A井、B井、C井、D井),其中B和C两口井在目的层牛蹄塘组有良好的页岩气显示。

2.1 约束稀疏脉冲反演

(1) 测井资料分析

不同测井曲线对储层的敏感程度不一样,通过交汇分析对储层进行测井曲线敏感性参数分析,找出不同曲线间区分岩性或含气性的岩石物理规律,通过对敏感曲线进行反演或模拟,开展储层预测。分析发现,研究区目的层牛蹄塘组含气页岩表现为低波阻抗、高自然伽马的特征(图4)。

(2) 层位标定

层位标定是构造解释和储层研究中最基础的工作,是连接地震、地质和测井工作的桥梁^[36]。研究区目的层牛蹄塘组底界(E_1n)为大套泥页岩与震

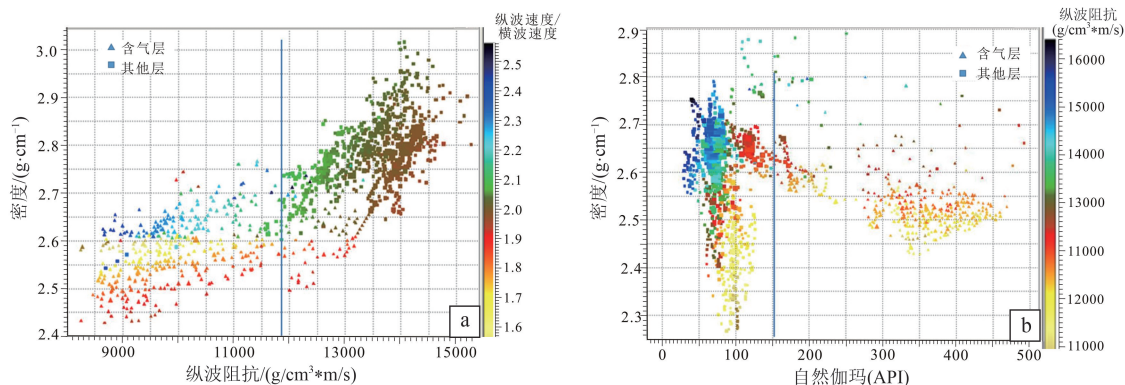


图4 测井曲线敏感参数分析

Fig. 4 Sensitive parameter analysis of logging curve

a—B井牛蹄塘组密度-波阻抗交汇图;b—C井牛蹄塘组密度-自然伽马交汇图

且系白云岩的分界面,是由低阻进高阻的强波阻抗界面,地层成层性好,同向轴稳定,作为本次层位标定的标志层,对工区4口井逐一进行合成记录的标定,通过标定以确定最佳的地震子波,为后续的波阻抗反演做准备。

(3) 建立约束模型

测井资料在纵向上精确地展示了井位置处岩层的波阻抗变化,地震资料则是连续记录研究区岩层波阻抗的深度变化,两者有机结合,可建立空间波阻抗模型。在构造解释的基础上,综合地质、地震、测井等信息,同时充分考虑解释层位之间的接触关系,保留地层的构造、沉积及层序在空间上的变化特征,建立研究区反演初始模型(图5)。

(4) 约束稀疏脉冲反演

从过井反演剖面(图6)可以看出,牛蹄塘组页岩气表现为相对低阻抗特征,基本结论与测井分析结果一致。反演的波阻抗反映了岩性横向变化的基本特征,但还需要借助其他方法进一步区分岩性,提高预测的可靠性。

2.2 属性分析

本次选择频率类属性,对原始地震资料进行频谱分析后,利用频谱的变化特征来识别储层和油气。首先利用钻井、测井、地震等资料开展储层精细标定,确定目的层地震层位及分析目标时窗;其次对目的层段进行频谱计算,结合钻井资料分析,确定储层流体预测低频敏感段或高频敏感段;根据确定的频率段选择方法;最后综合研究区实际钻井数据,分析预测结果与储层含气性关系,完成目标

评价。

图7-a为过井常规地震剖面,图7-b为流体活动性属性剖面。在常规地震剖面上波组特征的横向变化并不能直观地反映储集层横向变化特征;而在流体活动性属性剖面上的红色指示流体活动性强,蓝色指示流体活动性弱。该属性清晰地反映了储层流体的横向变化,气井B井测井解释的含气层段与预测结果吻合,D井在牛蹄塘组无气层,流体活动性属性剖面上表现为蓝色的差储层分布,2口井点处流体活动属性的差异反映了是否含气。

图7-c为过井高亮体属性剖面显示,属性剖面上的红色指示了油气,特征与流体活动性属性基本一致。

图7-d为过井油气检测属性显示。low为低频能量,high为高频能量,div为高低频能量之商,反映油气。碳氢检测主要是利用含油气之后引起频率域的变化特征来实现的,表现为主频向低频端移动,低频能量增强、高频能量衰减的特征。从图可以看出与其他属性相似,在油气富集地区低频增加的现象很明显。

2.3 综合分析

叠后地震反演能够获得地层阻抗值并较好显示地层空间分布,属性预测能够直接指示异常区。根据稀疏脉冲波阻抗反演的结果和属性分析结果对研究区目的层牛蹄塘组页岩储层发育情况进行综合分析,分别从地球物理角度圈出剖面上可能的含气页岩范围,进而通过将低波阻抗区域和地震属性异常区域叠合,实现有利页岩储层平面展布范围

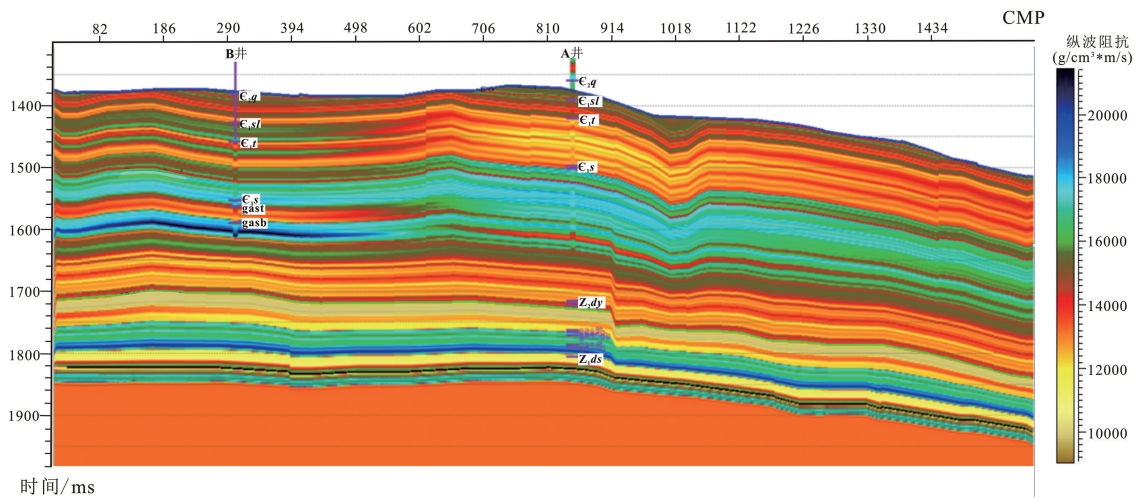


图 5 O15L2 线稀疏脉冲反演初始模型

Fig. 5 Initial model of sparse pulse inversion(O15L2)

C_{2q} —中寒武统罩庙组; C_{1sl} —下寒武统石龙洞组; C_{1t} —下寒武统天河板组; C_{1s} —下寒武统石牌组;
 Z_{2dy} —上震旦统灯影组; Z_{1ds} —下震旦统陡山沱组;gasb—牛蹄塘组气层 t;gasb—牛蹄塘组气层 b

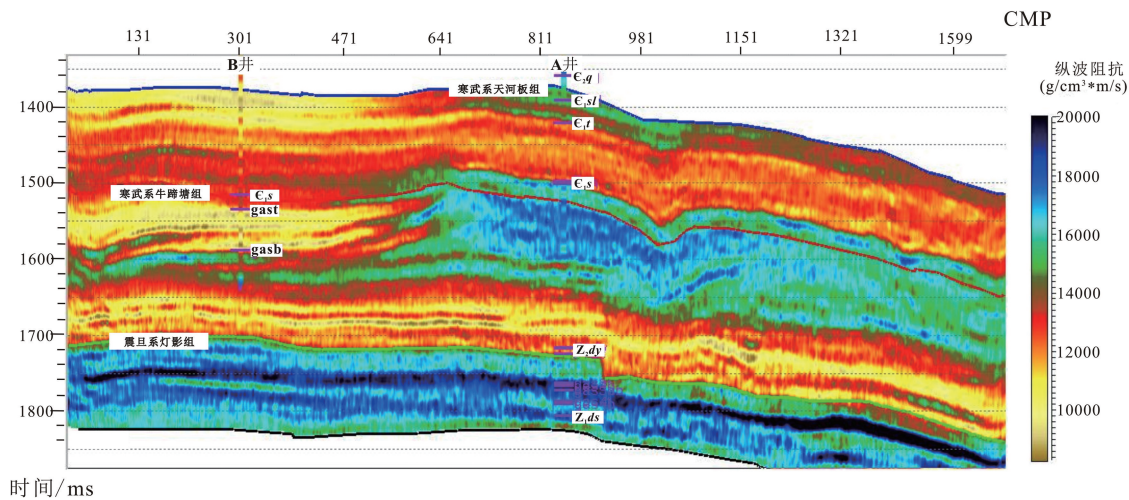


图 6 O15L2 线约束稀疏脉冲反演剖面图
(地层代号注释同图 5)

Fig. 6 Inversion profile of constrained sparse pulse(O15L2)

的预测。综合分析发现,研究区东区牛蹄塘组含气页岩集中在东区西部;西区牛蹄塘组含气页岩集中在西区西南部,得到牛蹄塘组 2 个含气页岩发育有利区(图 8 蓝色线圈)。

3 结 论

通过典型南方页岩气勘探新区页岩气储层预测研究,克服了区内地球物理资料少、地震资料信

噪比低、储层预测有效性差的问题,应用叠后地震反演结合地震多属性分析,综合预测页岩有利储层,圈定了含气异常区,在实际生产中取得了较好的效果,可为页岩气勘探新区有利区优选提供参考思路。

(1) 利用约束稀疏脉冲波阻抗反演,综合地震资料横向分布和测井资料纵向高频信息优势,可反演获得用于页岩储层解释的波阻抗剖面。该方法基于地震资料,不依赖初始模型,适合页岩气勘探新区。

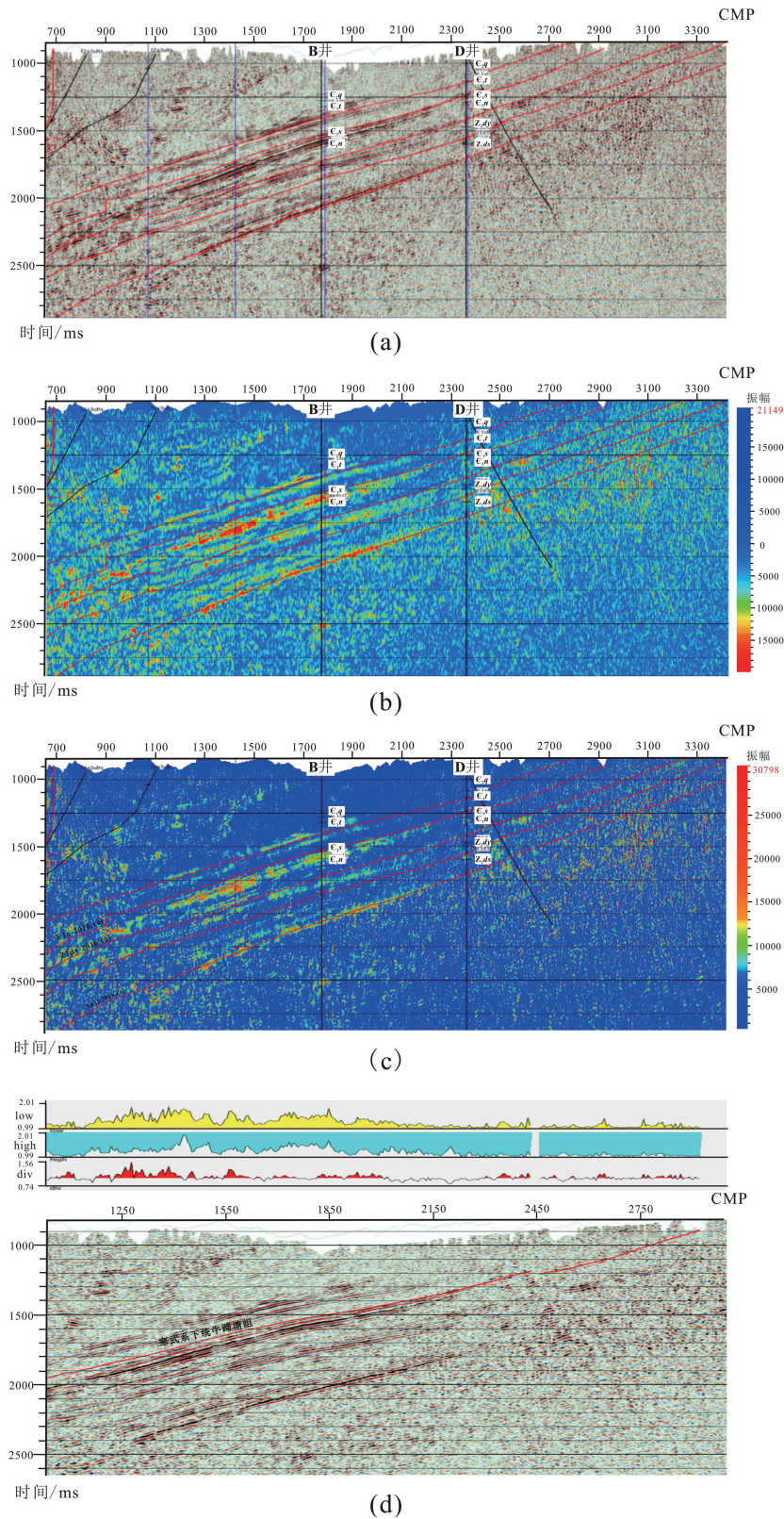


图 7 Z15D1 线地震属性剖面

Fig. 7 Seismic attribute profile of exploration line Z15D1

a—常规地震剖面;b—流体活动性属性剖面;c—高亮体属性剖面图;d—油气检测属性图;
C_{1n}—下寒武统牛蹄塘组;其他地层代号注释同图 5

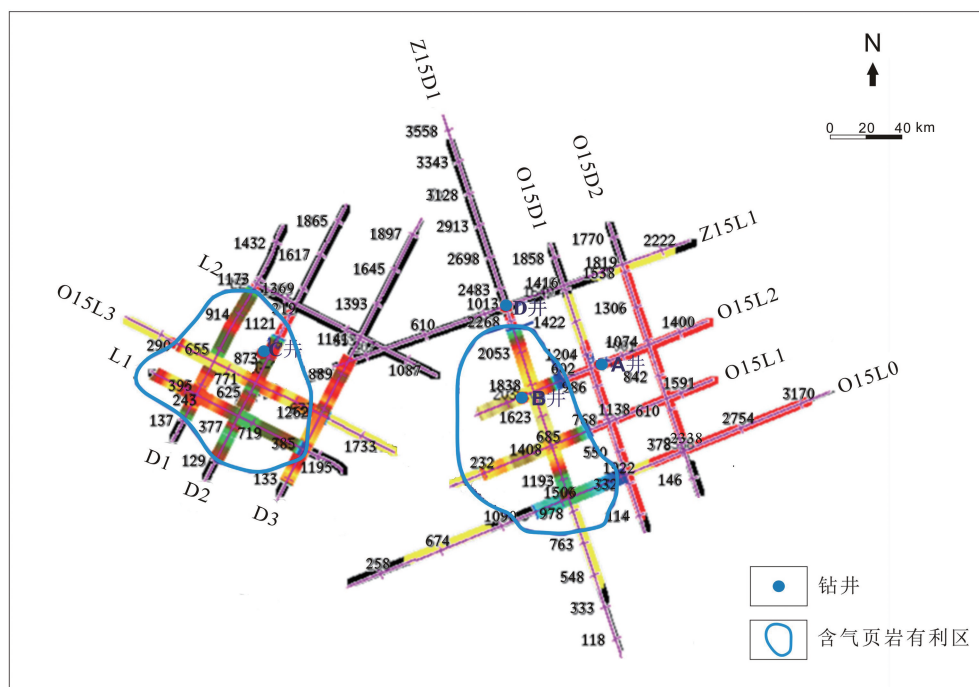


图8 牛蹄塘组含气页岩预测平面图

Fig. 8 Geological plan showing prediction of gas-bearing shale in Niutitang Formation

(2)地震波通过含油气地层时,高频明显被吸收,利用流体活动性、高亮体、DHAF 油气检测等频率类属性,能够刻画页岩含气性,对未来页岩气“甜点”预测工作具有较好的指导意义。但不同地区由于地质条件差异、页岩储层本身差异等,不同属性对含气性的指示程度也不同,实际应用中需结合地质和钻井资料认识加以筛选并进一步分析。

(3)综合反演结果和属性分析技术,对南方某页岩气区块页岩气储层分布进行预测,圈定了含气有利区,为勘探部署提供了依据。在该区部署的2口水平井压裂试气均获得页岩气高产工业气流,目前区块已进入商业勘探开发阶段。

(4)本次研究仅基于地震和测井资料分析了页岩气储层有利区,未考虑储层本身沉积环境、保存条件等地质因素,实际研究中,应结合区域地质资料,开展进一步综合评价。

致谢:感谢论文撰写过程中,中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司综合物化探处专家刘伟、李陶给予的指导与帮助。

参考文献

[1] 李建忠,董大忠,陈更生,等.中国页岩气资源前景与战略地位[J].

- 天然气工业,2009,29(5): 11-16.
- [2] 崔景伟,朱如凯,范春怡,等.页岩层系油气资源有序共生及其勘探意义——以鄂尔多斯盆地延长组长7 页岩层系为例[J].地质通报,2019,38(6): 1052-1061.
- [3] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2/3): 324-336.
- [4] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6): 641-653.
- [5] 王书彦,李瑞,王世谦.页岩气勘探开发基本特征与程序[J].天然气工业,2015,35(6): 124-130.
- [6] 张大伟.加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J].天然气工业,2011,31(5): 1-5.
- [7] 杨瑞召,赵争光,庞海玲,等.页岩气富集带地质控制因素及地震预测方法[J].地学前缘,2012,19(5): 339-347.
- [8] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2): 166-178.
- [9] 王延光.储层地震反演方法以及应用中的关键问题与对策[J].石油物探,2002,41(3): 299-303.
- [10] 李玉凤,孙炜,何巍巍,等.基于叠前反演的泥页岩地层压力预测方法[J].岩性油气藏,2019,31(1): 113-121.
- [11] 沈林克.塔里木盆地北部地震地层解释与油气检测[M].武汉:中国地质大学出版社,1993: 35-80.
- [12] 郭朝斌,杨小波,陈红岳,等.约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用[J].石油物探,2006,45(4): 397-401.
- [13] 许名文,姜瑞波,雷新华,等.稀疏脉冲波阻抗反演技术在储层预测中的应用.油气地地球物理,2011,9(2): 24-27.

- [14] 张义,尹艳树.约束稀疏脉冲反演在杜坡油田核三段中的应用[J].岩性油气藏,2015,27(3): 103-107.
- [15] 张勇,宋维琪.基于储集层地质模式用多种地震属性参数预测砂体含油气性[J].石油勘探与开发,2001,28(4): 60-63.
- [16] 王永刚,谢东,乐友喜等.地震属性分析技术在储层预测中的应用[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(3): 30-32.
- [17] 葛明娜,任收麦,包书景,等.陆相页岩含气性分析及勘探远景:以松辽盆地南部青一段为例[J].中国矿业,2019,28(2): 165-171.
- [18] 黄中玉,王于静,苏永昌.一种新的地震波衰减分析方法——预测油气异常的有效工具[J].石油地球物理勘探,2000,35(6): 768-773.
- [19] 毕研斌,龙胜祥,郭彤楼.应用频率衰减属性预测 TNB 地区储层含气性[J].石油与天然气地质,2007,28(1): 116-120.
- [20] 张波,王真理,周水生.谱分解在含气检测中的应用[J].地球物理学进展,2010,25(4): 1360-1364.
- [21] 宋效文,马世忠,秦秋寒,等.频谱分解技术在深层致密砾岩气藏检测中的应用[J].石油地球物理勘探,2012,47(1): 107-114.
- [22] 徐秋枫,陈建文,姚泉,等.频谱分解技术在泥页岩储层含气性预测中的应用——以柴达木盆地鱼卡凹陷为例[J].地质通报,2016,35(2/3): 348-355.
- [23] 张勇.彭水区块页岩脆性与含气性定性预测[J].油气藏评价与开发,2017,7(1): 78-82.
- [24] 蒋旭东,曹俊兴,逮宇佳,等.川东南地区海相页岩气层 TOC 含量多参数融合预测[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(1): 121-128.
- [25] 李远,程飞,雷栋,等.基于页岩岩石物理分析技术的 TOC 和脆性预测[J].石油地球物理勘探,2018,53(S2): 15,224-230.
- [26] Pebecca B L, Rick D. An interpreter's guide to understanding and working with seismic -derived acoustic impedance data [J]. The Leading Edge, 2000, 56(3): 246-255.
- [27] 宋增强.叠后地震反演技术预测河道砂体[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4): 154-159.
- [28] 何丽娟,熊冉,雷海飞,等.约束稀疏脉冲反演在大庆茂兴地区泉四段储层研究中的应用[J].沉积与特提斯地质,2009,29(1): 92-95.
- [29] 许名文,姜瑞波,雷新华,等.稀疏脉冲波阻抗反演技术在储层预测中的应用[J].油气地球物理,2011,9(2): 24-27.
- [30] 刘成斋,冉建斌,杨永生,等.稀疏脉冲和基于模型反演在王家岗沙四段砂岩油藏精细勘探中的应用[J].石油地球物理勘探,2002,37(4): 401-406.
- [31] 王惠勇,陈世悦,张云银,等.东营凹陷浊积岩优质储层预测技术[J].石油地球物理勘探,2014,49(4): 776-783.
- [32] 闫文华,陈宗翠,马喜梅,等.煤层气地震解释技术应用及效果——以沁水盆地郑庄区块三维为例[J].石油地球物理勘探,2012,47(增刊): 66-71.
- [33] 撒利明,梁秀文,刘全.一种基于多相介质理论的油气检测方法[J].勘探地球物理进展,2002,25(6): 32-35.
- [34] Sa L M, Wang S X, Mu Y G, et al. A New Method for Hydrocarbon Detection Based on Multi-phase Theory [J]. Applied Geophysics, 2004, 1(2): 83-88.
- [35] 汪佳蓓,黄捍东,郭飞.基于双相介质的地震波衰减特性油气检测方法[J].东北石油大学学报,2016,40(2): 19-26.
- [36] 凌云研究组.测井与地震信息标定研究[J].石油地球物理勘探,2004,39(1): 68-75.