

地震多属性体融合识别混合岩相火山机构

梁正中¹ 李 宁²

1. 榆林学院化学与化工学院, 陕西 榆林 719000;

2. 中国石化东北油气分公司勘探开发研究院, 吉林 长春 130062

摘 要:不同火山岩相在地震上表现为不同的地震反射特征,而火山多期喷发及后期构造改造使其地震反射特征更为复杂化,运用单一地震属性同时刻画两种或多种混合岩相火山岩较为困难,因此,在无井区准确部署火山岩探井难度很大。针对松辽盆地松南断陷火山岩储层,结合火山机构的不同特点,优选出瞬时振幅一阶导与低频振幅两种分别针对爆发相和溢流相较为敏感的地震单属性,与反映机构内部裂缝发育的蚂蚁体进行数据体融合,较好地解决了火山岩相快速清晰识别和火山机构边界及内幕裂缝发育情况准确刻画的问题。经松南断陷S地区多口井实钻验证,储层预测结果与实钻情况相符。因此,该方法可以为类似无井区火山岩勘探部署提供可靠依据。

关键词:火山岩储层;松南断陷;多属性体聚类;蚂蚁追踪;体融合

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.03.011

Mixed Facies of Volcanic Mechanism Recognition in Songnan Fault Depression by Seismic Multi-Attribute Fusion

Liang Zhengzhong¹, Li Ning²

1. College of Chemistry Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi, 719000, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Northeast Oil and Gas Company, Sinopec, Changchun, Jilin, 130062, China

Abstract: It has been proved that the volcanic gas reservoir has high output and large reserves in Songnan fault depression of Songliao basin and the volcanic rock reservoir in non-well area is an important target for oil and gas exploration being in present of low oil price. Due to the fact that different volcanic facies have different seismic reflection feature on the seismic section, and several volcanic eruptions and the late tectonic reworking make the seismic reflection characteristics more complicated, using a single seismic attribute to describe two or more mixed volcanic facies is very difficult. Based on analysis of response relationship between the development of different lithofacies reservoirs and the sensitive attribute, technique of seismic multi-attribute fusion was applied. The volcanic reservoir were predicted by using the attribute fusion method of multi-attributes clustering and ant tracking, among which, the multi-attributes combining

收稿日期:2018-12-28

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划项目“鄂尔多斯盆地东北部页岩气富集机理研究”(2017JM4017);榆林学院高层次人才科研启动基金“鄂尔多斯盆地北部非常规天然气勘探开发潜力研究”(16GK18)

作者简介:梁正中(1978-),男,湖北潜江人,副教授,博士,主要从事油气勘探综合地质研究。

with two main types of sensitive seismic attributes of volcanic rocks; derivative instantaneous amplitude and low-frequency amplitude. The method can identify volcanic facies from other facies quickly and clearly, describe the boundary of the volcanic mechanism and development situation of the fractures of volcanic mechanism inside. The seismic multi-attribute fusion method was used to describe the reservoir of the mixed rock facies in S area of Songnan fault depression and the prediction results are consistent with the actual drilling, which can provide the basis and technical reference for the exploration and deployment of volcanic rocks in the non-well area.

Keywords: Volcanic reservoir; Songnan fault depression; Multi-attributes clustering; Ant-tracking; Attribute fusion

0 前言

地震属性是地震解释的重要内容。在油气勘探初期,无井或少井阶段,利用叠后地震属性能够为储层提供定性的认识;钻井增多后,通过建立属性与储层特征的关系,能实现储层特征的空间定量预测。近年来,在松辽盆地深层火山岩储层中发现了大规模的天然气藏。在火山岩储层的勘探开发进程中,涌现了很多利用三维地震资料刻画火山岩的技术。李明、张明学等人^[1-2]相继对松辽盆地火山岩储层利用地震反演及地震波形属性分析等技术进行了总结应用,从单属性上对火山岩的平面分布进行了研究。于宝利等人^[3]则是主要使用均方根振幅属性预测了各个层序的火山岩相带纵横向分布特征。宋鹏等人^[4]通过倾角属性对王府断陷火石岭组火山岩储层裂缝分布规律也进行了预测。

地震属性分析是一种快速、有效的储层预测方法,但对多物源、相变快、多期次火山活动、岩石成分较复杂的断陷盆地,预测精度会明显降低^[5-7]。在地震属性储层预测中,单一属性的预测会导致预测结果的多解性,因此需要进行多属性体的融合研究,使融合数据中尽可能多地包含原始数据中的有用信息。对于未勘探或勘探初期的火山机构,如何针对火山岩不同特征优选出有效的多种地震属性来综合刻画其边界及内部特征显得尤为重要。利用多属性研究碎屑岩在一些区域取得了较好效果^[8-9],但是面向火山岩刻画的多属性方法应用并不广泛,尤其是在同时刻画出多种岩相火山机构方面值得尝试。

本次研究在地震多属性体融合技术分析基础上,针对松辽盆地火山岩机构难以刻画及储层裂缝发育规律不清的特点,优选出对爆发相和溢流相较为敏感的地震单属性与蚂蚁体进行数据体的融合。通过将反映火山岩不同特征的地震属性体融合进行火山岩储层识别,在松南断陷 S 地区的储层预测结果与实钻情况相符,说明该方法可以为无井区火山岩勘探部署提供依据。

1 技术原理

1.1 多属性体融合

地震多属性体融合已逐渐成为一种新兴的属性分析方法。多属性融合技术往往用于平面属性较多,体融合则是在平面属性的基础上增加了时间维度。

多属性体聚类地震相也属于体融合方法的一种,以往地震相体用来进行海相礁滩体的刻画曾取得较好效果^[10]。现有的聚类方法比较多,主成份分析主要是通过降低属性维数,参加聚类的四种属性中三种属性贡献多且相似多,包含地震资料主要趋向信息,而另外一种属性则会被作为噪音去除,应用较多的还有神经网络、遗传算法、分级聚类等都可以实现多属性聚类地震相的体分析。分析地震相体一般是针对目的层段进行的,需要用层位来确定地震相分析层段的顶底。在整个分析流程中,需要人为控制的参数主要是分类数,即根据分析地震相体的目的和资料情况,来确定将多属性地震数据体综合划分为多少类,一般分类数的多少也需要迭代确定。同时由于各种属性的量纲不一致,需先对各种属性体进行归一化。

$$A = \frac{A_i - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (1)$$

式中: A 为归一化后的地震属性; A_i 为实际地震属性值; $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 分别为地震属性的最大和最小值。

对于同类地震属性,如分频振幅与均方根振幅等振幅类属性,统一量纲之后需要根据相关性好的属性进行体聚类比较有地质意义;而不同类的地震属性,如振幅属性与几何类属性,聚类结果不能凸显各种属性的地质含义,则通过逻辑运算来进行体融合。

1.2 火山岩相地震属性识别

火山岩相通常分为爆发相、溢流相、火山通道相、侵入相及火山沉积相几种主要类型^[10-16],在地震剖面上与围岩相比有其独特的地震反射特征,然而由于与围岩接触关系复杂,刻画火山机构的边界及空间分布仅仅通过地震反射较为困难。为了选出能反映火山岩岩性的地

震属性,需要根据其在地震剖面上的隐藏信息寻找能表征的地震属性^[10]。

火山岩埋藏深度普遍较深,其上覆地层对地震波的频散作用也很大,导致火山岩地震反射波呈现低频形象^[17]。对于类似爆发相火山岩的杂乱反射,根据其低频高能反射特点,通常利用低频振幅进行刻画,只需优选合适的分频振幅即可。而对于溢流相类的火山岩,根据其相对可以连续追踪的层状反射特征,建立地震属性与岩相对应关系。测井曲线中对岩性最为敏感的是伽马曲线,对伽马曲线与常用的 24 种井旁道地震属性的相关性进行计算,能够相对定量地评价地震属性与岩性的相关性,发现瞬时振幅一阶导属性的相关性好。相关性计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sum_{k=1}^n \sqrt{(x_k - \bar{x})^2 (y_k - \bar{y})^2}} \quad (R = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: R 为 x 和 y 两种属性的相关系数, x_k 和 y_k 分别为第 k 口井的两种属性, $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别代表两种属性的平均值。

1.3 裂缝识别

识别裂缝通常用到叠后地震的几何类属性,如相干、曲率、倾角等属性。在具有叠前方位各向异性地震数据的条件下,利用地震属性中对裂隙比较敏感的方位振幅、方位层速度、方位 AVO/FVO 梯度、方位频率等属性,能够实现对裂缝方位、裂缝密度等参数的描述。这些属性能够反映地震反射的不连续性,尤其是在应用这些属性的基础上进一步进行蚂蚁追踪更加清晰直观,可以更有效地指导裂缝的平面及剖面解释,对于小型裂缝刻画也较常规几何类属性有明显的优势^[18-19]。

裂缝也是火山岩机构储层发育的主要指示,因此优选几何属性进行裂缝预测。研究发现,相干属性平面识别小断裂效果虽好,但是在剖面上却比较粗糙,用来识别裂缝显得分辨率不足。通过对比优选,认为基于叠后地震资料的蚂蚁追踪算法对火山机构的裂缝进行检测效果相对较好,但是在计算过程中常常引入一些噪音信息。因此,在蚂蚁属性研究中需要对地震资料进行构造导向滤波处理,突出有效裂缝信息,也便于增强后期与其他属性融合的效果。

2 应用效果分析

2.1 工区地质背景

S 工区构造上位于长岭凹陷南部,断陷层地层向上超覆,为油气有利运聚区。发育有碎屑岩储层和火山岩储层,其中火山岩储层主要位于断陷层至断拗转换带,发育各类中-基性、酸性火山喷发岩,形态多为喷发形成的溢流相火山,还有刺穿状的火山岩株、沿层侵入层

状火山岩席等。

根据区块的单井、联井火山岩相划分、对比以及钻探成果显示,研究区主要发育爆发相和溢流相,另外还有少部分的侵出相。而爆发相和溢流相往往是较好的火山岩储集岩相带,因此,需要对这两种火山岩相在地震上进行进一步识别。

2.2 工区火山岩相识别与裂缝预测

火山岩气藏地质结构极其复杂,非均质性极强,具有岩性岩相变化快、厚度变化大、连续性及可比性差等特点,属世界级难题。基于研究区复杂地质条件,笔者通过多属性体融合进行火山岩储层识别^[20-22]。首先从众多的地震属性中选一种或几种能够反映火山岩性质的地震属性,结合钻井识别出火山岩相;然后通过蚂蚁算法预测火山岩裂缝的发育情况;最后将反映火山岩不同特征的地震属性进行体融合,在融合后的数据体上能够快速识别出无井区的火山岩有利储层。

对于溢流相火山岩,通过进行岩性敏感地震属性的优选,计算岩性与井旁道地震属性的相关系数,其中单属性中瞬时振幅一阶导与伽马的相关性最好,能达到 0.64;其他地震属性相关系数绝对值低于 0.5,说明单属性达不到研究火山岩的条件。为此,对于溢流相火山岩则选用与岩性曲线相关性相对较好的瞬时振幅一阶导属性,而爆发相火山岩主要利用其低频段高能量特征,通过优选认为 10 Hz 低频振幅能反映爆发相火山岩。因此,选用了瞬时振幅一阶导和低频振幅属性二种属性进行体融合,能够一次快速从地震剖面上识别出爆发相和溢流相的火山岩。通过优选的地震属性与原始地震波形进行多属性聚类分析,得到的地震相体见图 1,图 1 中黄橙色表征火山岩相的分布。

通过蚂蚁属性预测裂缝的研究分为三个部分:首先对地震资料进行构造导向滤波处理,接着提取反映不连续性的相干属性,再利用相干属性进行蚂蚁体计算。原始地震与计算的蚂蚁体叠合的连井剖面反映火山机构内幕主要以近直立的裂缝为主,并且以 A 井火山机构裂缝密度最大。

2.3 结果分析

多属性地震相体与蚂蚁体融合的平面图见图 2,图 2 中黄红色表征火山岩的平面分布,黑色则表征裂缝的走向和密度。A 井与 B 井所在的火山机构在三维地震剖面上呈现类似丘状外形和杂乱反射特征,为火山口-火山口近源相带的爆发-溢流相反射特征。从平面图上可以看出,此机构在营城组的分布规模大于其他火山机构,且裂缝非常发育,呈网状分布。A 井实钻地层仅到登娄库组,主要为一套火山碎屑岩、火成岩地层,岩性以安山岩和玄武岩为主,取芯可见裂缝,火山岩平均孔隙度

为 10 %。位于同一火山机构的 B 井测井解释裂缝带 5 层共 58 m,该井多段取芯也证实了此火山机构裂缝非常发育。C 井为位于 SJH 东部的另一火山机构,综合蚂蚁

体识别出的裂缝与录井及取芯资料揭示的裂缝信息进行交互验证分析,C 井较 B 井火山机构规模小、裂缝发育少,与实钻情况相符。

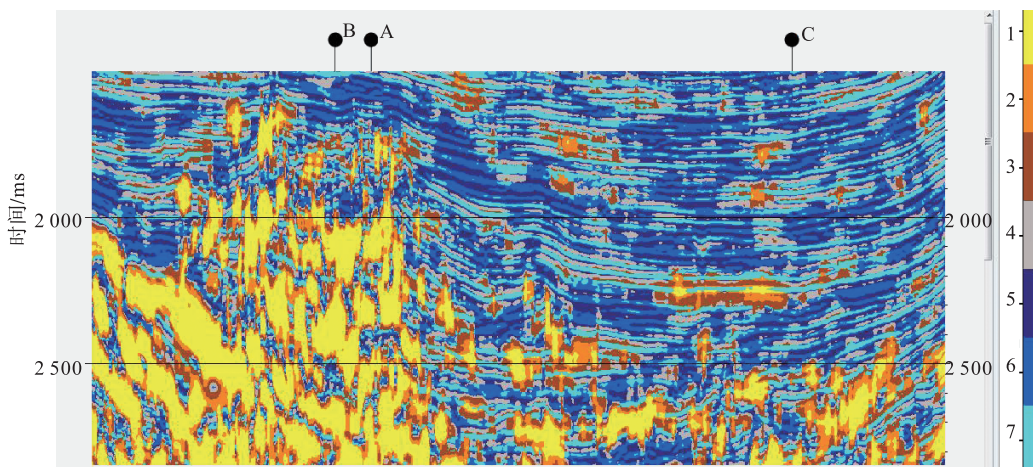


图 1 多属性聚类地震相体连井剖面图

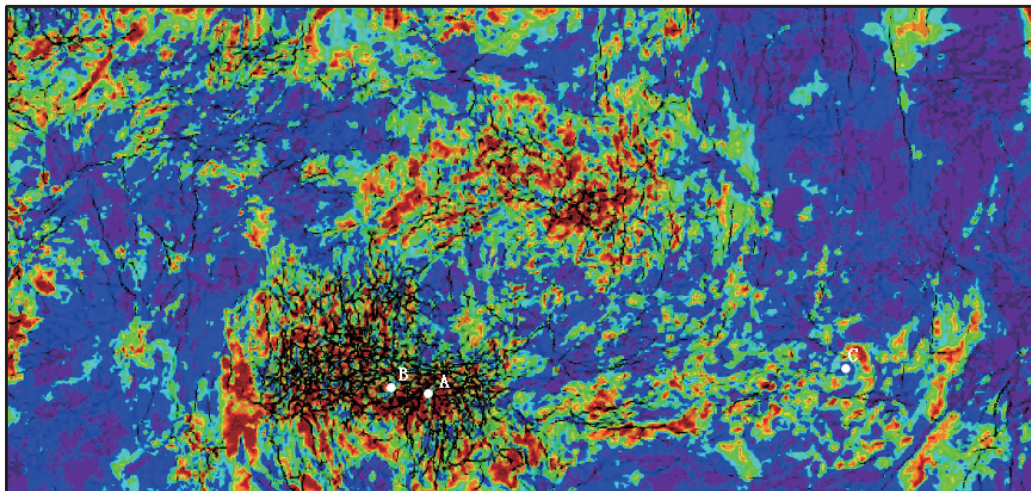


图 2 地震相体与蚂蚁体融合平面图

3 结论

1) 多属性聚类地震相体能够较为有效地同时识别爆发相火山机构及溢流相层状火山岩,刻画精度与所选的单属性对火山岩的敏感程度密切相关,因此单属性优选至关重要。

2) 所用的地震资料品质越高,选用来计算蚂蚁体的算法越能反映地震的不连续性,最后得到的蚂蚁体刻画火山岩裂缝的精细程度才会越高。

3) 地震属性融合方法多样,并不是算法越复杂融合效果越好。同类地震属性与不同类地震属性融合方法不同,需要依据参与融合的地震属性的自身特点来量身定制合适的方法。

4) 在松南断陷 S 地区数口井的储层预测结果与实钻情况相符,该方法可为无井区火山岩勘探部署提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 李明,邹才能,刘晓,等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏识别与预测技术[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(5): 477-484.
Li Ming, Zou Caineng, Liu Xiao, et al. Identifying and Predicting Technology of Deep Volcanics Gas Reservoir in North of Songliao Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37 (5): 477-484.
- [2] 张明学,吴杰,胡玉双. 松辽盆地丰乐地区营城组火山岩储层预测[J]. 地球物理学进展,2009,24(6): 2145-2150.
Zhang Mingxue, Wu Jie, Hu Yushuang. Prediction of Reservoirs in Volcanic Rocks of the Yingcheng Formation in the Fengle Area North of the Songliao Basin [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (6): 2145-2150.
- [3] 于宝利,刘新利,范素芳,等. 火山岩相地震研究方法及应用[J]. 新疆石油地质,2009,30(2): 264-266.

- Yu Baoli, Liu Xinli, Fan Sufang, et al. Seismic Technique and Application of Volcanic Rock Facies [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30 (2): 264-266.
- [4] 宋 鹏. 王府断陷火山岩组火山岩储层裂缝特征与分布规律[J]. 世界地质, 2015, 34(3): 716-725.
- Song Peng. Fracture Characteristics and Distribution of Volcanic Reservoir of Huoshiling Formation in Wangfu Fault Depression [J]. Global Geology, 2015, 34 (3): 716-725.
- [5] 魏 艳, 尹 成, 丁 峰, 等. 地震多属性综合分析的应用研究[J]. 石油物探, 2007, 46(1): 42-47.
- Wei Yan, Yin Cheng, Ding Feng, et al. Synthetic Analysis of Seismic Multi-Attribute and Its Application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46 (1): 42-47.
- [6] 蔡冬梅, 叶 涛, 鲁凤婷, 等. 渤海海域中生界火山岩岩相特征及其识别方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 112-120.
- Cai Dongmei, Ye Tao, Lu Fengting, et al. Lithofacies Characteristics and Identification Methods of Mesozoic Volcanic Rocks in Bohai Sea [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30 (1): 112-120.
- [7] 赵 虎, 尹 成, 朱仕军. 多属性融合技术研究[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(2): 119-122.
- Zhao Hu, Yin Cheng, Zhu Shijun. Technique of Seismic Multi-Attribute Fusion [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32 (2): 119-122.
- [8] 郭晓龙, 李 璇, 李 波, 等. 利用多属性融合方法预测新疆滴西178井区梧桐沟组薄砂岩储层[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1172-1180.
- Guo Xiaolong, Li Xuan, Li Bo, et al. Prediction of Thin Sandstone Reservoirs of Wutonggou Formation in the DX 178 Well Area of Xinjiang by Using Liquid Mobility Factor Method [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29 (8): 1172-1180.
- [9] 李启成, 郭 雷, 孙颖川, 等. 地震属性融合技术在煤层厚度预测中的研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2014-2020.
- Li Qicheng, Guo Lei, Sun Yingchuan, et al. Seismic Attributes Fusion and Its Research in Predicting Thickness of Coal [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32 (5): 2014-2020.
- [10] 谭开俊, 卫平生, 潘建国, 等. 火山岩地震储层学[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(4): 8-13.
- Tan Kaijun, Wei Pingsheng, Pan Jianguo, et al. Volcanic Seismic Reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22 (4): 8-13.
- [11] 黄 玉, 白晓寅, 郭 璇, 等. 层序约束下的火山岩储层地震反演技术及其应用[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(6): 89-92.
- Huang Yu, Bai Xiaoyin, Guo Xuan, et al. Seismic Inversion Technique Based on Volcanic Sequence and Its Application [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23 (6): 89-92.
- [12] 慕敦科, 齐景顺, 王 革. 徐家围子地区火山岩储层特征研究[J]. 特种油气藏, 2002, 9(4): 30-32.
- Qi Dunke, Qi Jingshun, Wang Ge. Study on Volcanic Reservoir Characteristics in Xujiaweizi Area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9 (4): 30-32.
- [13] 仇劲涛, 罗海炳, 王国勇. 东部凹陷中段火山岩成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2001, 8(1): 68-62.
- Qiu Jintao, Luo Haibing, Wang Guoyong. Igneous Reservoir Forming Conditions for Central East Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8 (1): 68-62.
- [14] 唐华凤, 张元高, 刘仲兰, 等. 松辽盆地庆深气田营城组地层格架特征及储层地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4): 730-741.
- Tang Huafeng, Zhang Yuangao, Liu Zhonglan, et al. Volcanostratigraphy Framework Characteristics and Its Reservoir Significance in QS Gas Field, Songliao Basin, NE China [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50 (4): 730-741.
- [15] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 18-23.
- Wang Pujun, Chen Shumin, Liu Wanzhu, et al. Relationship Between Volcanic Facies and Volcanic Reservoirs in Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24 (1): 18-23.
- [16] 唐华凤, 李瑞磊, 吴艳辉, 等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620-627.
- Tang Huafeng, Li Ruilei, Wu Yanhui, et al. Textural Characteristics of Volcanic Strata and Its Constraint to Impedance Inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (2): 620-627.
- [17] 魏 刚, 王 昕, 柴永波. 中心式喷发火山岩三维地震刻画方法[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 185-189.
- Wei Gang, Wang Xin, Chai Yongbo. Volcanic 3-D Seismic Characterization of Central Eruption Style [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34 (1): 185-189.
- [18] 周 文, 尹太举, 张亚春, 等. 蚂蚁追踪技术在裂缝预测中的应用——以青西油田下沟组为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 111-118.
- Zhou Wen, Yin Taiju, Zhang Yachun, et al. Application of Ant Tracking Technology to Fracture Prediction: A Case Study from Xiagou Formation in Qingxi Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27 (6): 111-118.

28(7):1097-1102.

Han Lingjuan, Wang Qiang, Yang Qihua, et al. Leak Detection and Localization Analysis of Underwater Gas Pipeline Based on Distributed Fiber Optic Sensing [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28 (7): 1097-1102.

- [13] 高 丽,朱 锋,司志梅. 输油管道光纤传感在线检漏监测先导试验研究[J]. 天然气与石油,2017,35(2):53-57.

Gao Li, Zhu Feng, Si Zhimei. Study on Online Monitoring Pilot Test of Pipeline Leak Detection Transmission Using Optical Fiber Sensing Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (2): 53-57.

- [14] 任顺顺. 油气长输管道泄漏检测技术研究[J]. 天然气与石油,2014,32(6):25-28.

Ren Shunshun. Study on Long-distance Oil and Gas Pipeline leakage Detection Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (6): 25-28.

- [15] 庄须叶,王浚璞,邓勇刚,等. 光纤传感技术在管道泄露检测中的应用与进展[J]. 光学技术,2011,37(5):543-550.

Zhuang Xuye, Wang Junpu, Deng Yonggang, et al. Optical Fiber Sensing Technologies for Pipeline Leakage Detection [J]. Optical Technique, 2011, 37 (5): 543-550.

- [16] 王 建. 分布式光纤振动传感系统设计—Sagnac 改进型结构设计研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

Wang Jian. The Design of Distributed Fiber Optic Vibration Sensing System—The Research and Design of the Modified Sagnac Structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.

- [17] 周新刚,高 阳,陈丰波,等. WiMAX 技术在 EMS 系统中的接入应用[J]. 天然气与石油,2016,34(6):104-107.

Zhou Xingang, Gao Yang, Chen Fengbo, et al. Application of WiMAX Technology in EMS System [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (6): 104-107.

- [18] 吴志平,蒋宏叶,李又绿,等. 油气管道完整性管理效能评价技术研究[J]. 天然气工业,2013,33(12):131-137.

Wu Zhiping, Jiang Hongye, Li Youli, et al. Efficiency Appraisal of Oil & Gas Pipeline Integrity Management [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33 (12): 131-137.

- [19] 袁 海,刘小晖,马 烨,等. 光纤安全预警系统在管道保护中的应用[J]. 江汉石油职工大学学报,2017,30(5):59-61.

Yuan Hai, Liu Xiaohui, Ma Ye, et al. Application of Optical Fiber Safety Warning System in Pipeline Protection [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2017, 30 (5): 59-61.

- [20] 陈井军. 光纤油气管道安全预警系统软件设计[J]. 湖南工业职业技术学院学报,2017,17(4):11-15.

Chen Jingjun. Software Design of Security Pre-warning System of Optical Fiber Oil Gas Pipelining Safety [J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2017, 17 (4): 11-15.



(上接第 60 页)

- [19] 巫 波,刘 遥,荣元帅,等. 蚂蚁追踪技术在缝洞型油藏裂缝预测中的应用[J]. 断块油气田,2014,21(4):453-457.

Wu Bo, Liu Yao, Rong Yuanshuai, et al. Application of Ant Tracking Technology in Fracture Prediction of Fracture-Vuggy Reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21 (4): 453-457.

- [20] 吴海波,王 江,李军辉. 地震多属性融合技术在贝尔凹陷储层预测中的应用[J]. 岩性油气藏,2014,26(2):96-101.

Wu Haibo, Wang Jiang, Li Junhui. Application of Seismic Multi-Attribute Fusion Technique to the Reservoir Prediction

in Beier Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26 (2): 96-101.

- [21] 于正军. 地震属性融合技术及其在储层描述中的应用[J]. 特种油气藏,2013,20(6):6-9.

Yu Zhengjun. Seismic Seismic Attribute Fusion and Its Application in Reservoir Description [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20 (6): 6-9.

- [22] 李婷婷,王 钊,马世忠,等. 地震属性融合方法综述[J]. 地球物理学进展,2015,30(1):378-385.

Li Tingting, Wang Zhao, Ma Shizhong, et al. Summary of Seismic Attributes Fusion Method [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (1): 378-385.