

文章编号: 1001-1986(2019)04-0159-06

地震勘探技术在煤系非常规气富集区预测中的应用

王树威

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了预测鄂尔多斯盆地东缘某勘探区煤系非常规气的资源富集区, 采用地震勘探方法在这一新领域进行预测。首先, 利用叠后波阻抗反演技术对储层进行岩性预测, 通过波阻抗阈值得到样点个数, 再与采样率计算出时间厚度, 然后乘以岩层速度得到岩层厚度; 其次, 采用叠前 AVO 反演技术对储层进行含气性预测, 经过分析含气饱和度与 AVO 相关属性参数之间的关系, 得出与有利含气区敏感性最高的属性特征。最后, 把储层厚度较厚和呈低拟泊松比属性特征的区域划定为各层含气有利区, 并对勘探区下石盒子组八段、山西组和本溪组的砂岩气和页岩气进行了富集区预测, 钻井验证效果较好。资源富集区的预测结果表明, 地震勘探技术在该区域对煤系非常规气这一新领域的预测是可行的, 此方法对其他区域煤系非常规气资源富集区的预测有借鉴意义。



关 键 词: 鄂尔多斯盆地东缘; 煤系非常规气; 波阻抗反演; AVO 反演; 低拟泊松比

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.024

Application of seismic exploration technology in forecasting unconventional gas enrichment area of coal measures

WANG Shuwei

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: For forecasting unconventional gas enrichment area in coal measures of eastern Ordos basin, seismic exploration was used to forecast the gas in this new field. First of all, it took the post-stack impedance inversion to forecast the lithology of the reservoir, it can get the number of sample points from the impedance threshold, and get the thickness of time by calculating the sampling rate, after that it can get the strata thickness by multiplying the thickness of time and the velocities of strata; second, it took the pre-stack AVO inversion to forecast the lithology gas-bearing properties of the reservoir, based on analyzing the relationship between gas saturation and the related AVO attribute parameters, we got the most sensitive attribute parameter of the favorable gas bearing areas. At last, it took the thicker reservoir and the low pseudo-Poisson's ratio attribute feature as the favorable gas bearing areas, and it forecasted the enrichment area of sandstone gas and shale gas in eighth member of Shihezi Formation, Shanxi Formation and Benxi Formation of the exploration area, and drilling verified that the effect is good. The result of forecasting the enrichment area shows that seismic exploration forecasting this new field of unconventional gas enrichment area in coal measures in this region is feasible, and this method has a reference meaning for forecasting unconventional gas enrichment area in coal measures in other areas.

Keywords: eastern Ordos basin; unconventional gas in coal measures; impedance inversion; AVO inversion; low pseudo-Poisson's ratio

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地, 其涵盖陕甘宁三地, 面积广, 达 37 万 km²[1]。作为中国具有“聚宝盆”之称的重要能源基地, 更有“上油下气”的说法, 其东缘煤层气、致密砂岩气和页岩气储量

都非常丰富。其四周群山怀抱, 三面黄河环绕, 西部和北部大漠荒原广布, 东部和南部黄土梁峁交错。鄂尔多斯盆地东缘是我国目前煤层气勘探开发的热点地区之一, 也是国内开展煤系非常规气勘探活动

收稿日期: 2019-01-15

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2017XAYZD10, 2013XAYCX018)

Foundation item : Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2017XAYZD10, 2013XAYCX018)

作者简介: 王树威, 1985 年生, 男, 河南郑州人, 助理研究员, 硕士, 从事煤田地震勘探及煤田地质工作. E-mail : 330277318@qq.com

引用格式: 王树威. 地震勘探技术在煤系非常规气富集区预测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4) : 159-164.

WANG Shuwei. Application of seismic exploration technology in forecasting unconventional gas enrichment area of coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4) : 159-164.

最早的地区之一^[2]，其东缘蕴含着丰富的致密砂岩气和页岩气资源，主要赋存于二叠系河道砂体中^[3]。

20世纪70年代，美国页岩气研究已经开展了三维地震勘探工作，并充分显示出地球物理技术已经成为页岩气勘探开发中必不可少的手段^[4]。煤层气、页岩气、致密砂岩气等煤系非常规气共生共存的现象已日趋受到业界的关注^[5-6]。研究表明煤及富有机质泥页岩为煤系非常规气系统的烃源岩，致密砂岩的孔隙度最大，煤层次之，页岩孔隙度最小；砂岩渗透率最大，比泥岩和煤层高很多；页岩气沿层面以顺岩层运移^[7-8]。目前，国家对煤系非常规气的开发利用程度还很低，所以进行除了煤层气以外的多气联合勘探开发具有显著的经济和社会效益^[9]。

21世纪以来，油田上对致密砂岩和页岩的储层含气性富集区预测主要是针对叠前的地震资料，利用叠前的 AVO(Amplitude Versus Offset，简称 AVO)地震属性及叠前弹性波阻抗进行含气性预测研究，效果很好^[10]。但是，针对煤系非常规气中的砂岩气和页岩气等资源富集区的地震勘探预测目前研究较少，进行的工程实例也很少，砂、页岩气储层的岩石实验分析技术及物理基础研究还属空白。本文结合鄂尔多斯盆地东缘某工区二维地震勘探实例，为实现多气共探，针对鄂尔多斯盆地东缘储层中的砂岩气和页岩气富集区预测开展了地震勘探工作(主要将地震方法用于含气储层的分布、厚度及储层物性、含气性等方面预测)。

1 预测方法

煤系非常规气富集区预测包含岩性预测和含气性预测两个方面。

岩性预测是通过叠后波阻抗反演技术实现的，以叠后地震资料为基础，属于振幅反演方法，它利用叠后地震反演来分析地震道，重建地层的速度和声阻抗结构^[11-12]。

含气性预测是通过叠前 AVO 反演技术实现的，地震反射振幅随炮检距变化的研究是在叠前道集上分析振幅随炮检距的变化规律，估算岩石的弹性参数、分辨岩性和孔隙填充物，预测油气资源量，主要是利用反射系数随入射角变化的基本原理^[13-14]。

1.1 岩性预测

目前，使用约束稀疏脉冲反演算法是一个趋势，约束脉冲背景下的稀疏脉冲反演方法，其根本依据是假设地下的岩石界面中，强反射系数的界面是稀疏排列分布的，而不是连续分布的^[15]。约束稀疏脉冲反演(Constrained Sparse Spike Inversion)的目标是利用约束井资料及地震反射系数建立声波阻抗数据

体^[16]。

具体分为 4 个步骤：测井一致性校正、初始模型建立、反演子波提取和波阻抗数据体反演。首先利用各岩性在测井曲线上的响应差异，精细划分出所选用井的煤层、砂岩、泥岩和页岩所发育的位置。然后通过岩石物理分析，对波阻抗曲线，自然伽马曲线以及岩性曲线等作交会分析，试图得到区分目标岩性的曲线波阻抗属性阈值。然后统计每个 CDP 点该层波阻抗阈值以上(或以下)样点的个数，样点个数×采样率/2 作为本层的时间厚度，再与岩层速度相乘得到岩层的厚度^[17]。

1.2 含气性预测

AVO 是在叠前道集上对“振幅随炮检距变化”的特征进行分析，以此对岩石中孔隙流体的性质和岩性做出预测^[18]。它的基本原理是平面波在分界面上的反射和透射理论。

具体步骤分为 3 个步骤：叠前道集分析及处理、储层含气性测井响应特征分析和梯度-截距属性提取。通过分析截距和梯度的变化规律，了解储层气含量与 AVO 属性之间的关系^[19]。再利用叠前 CRP 道集，提取目的层 AVO 截距 P 和梯度 G 的属性^[10]。在分析了含气井与非含气井井旁道 AVO 响应特征的基础上，拟泊松比($P+G$)两种属性作为 AVO 流体因子敏感属性检测储层的含气性，最后提取井口位置的拟泊松比属性特征。

2 应用研究

研究区位于鄂尔多斯盆地东部，区内山高谷深、地形复杂^[20]。研究区的地势总体为东高西低，属侵蚀较为强烈的梁峁状黄土地貌。基岩地层仅出露于沟谷地带，山顶、山梁大面积为黄土覆盖。勘探区为二维工区，有 4 条二维测线。

2.1 处理思路

原始资料总体表现为：记录面貌良好，大部分炮集记录信噪比较好，但由于激发条件不同(有洛阳铲打的土孔和山地钻打的基岩孔)单炮之间的频率变化较大；反射波信号很强，有效波频率范围为 15~70 Hz，主频约 33 Hz。

根据地质任务要求做煤系非常规气富集性预测，需要做 AVO 属性分析及岩性反演，因此，在构造勘探基础上，保幅处理是重中之重。需要在解决激发和接收条件不同带来的振幅和频率差异的基础之上，同时得到较高的纵、横向分辨率。

2.2 叠后反演及效果分析

勘探区煤层、砂岩、泥岩、灰岩在物性与电性特征存在很大的差异，测井响应(GR、AC、RHOB、

电阻率测井系列曲线)各异,以T-01井为例(图1),煤层表现为低密度与高声波时差(最显著特征)、低自然伽马、高电阻率;泥岩为高自然伽马(区别于煤、砂岩、灰岩的最显著特征)、电阻率一般较低;砂岩为低自然伽马(一般呈箱型、钟型、漏斗型、指状)与泥岩相比高电阻率、高纵波速度、高孔隙率;灰岩表现为极低的自然伽马与极高的电阻率(显著特征)、高纵波速度、较高的密度。

首先利用各岩性在测井曲线上的响应差异精细划分出所选用井的煤层、砂岩、泥岩所发育的位置。然后通过岩石物理分析,对工区内各井孔的波阻抗曲线,自然伽马曲线以及岩性曲线等作交会分析,找到区分目标岩性的曲线波阻抗属性阈值^[21]。

在下石盒子组、山西组和本溪组时窗内,分别得到井孔自然伽马曲线与波阻抗曲线的交会图(图2),从图2可见波阻抗参数在各个层组内均能区分砂岩和泥岩,但是阈值不相同,随着埋深增大波阻抗阈值逐渐增大,符合常规的地质认识。所以也可以通过波阻抗反演获取各地层砂岩、页岩的分布,并求取其厚度。

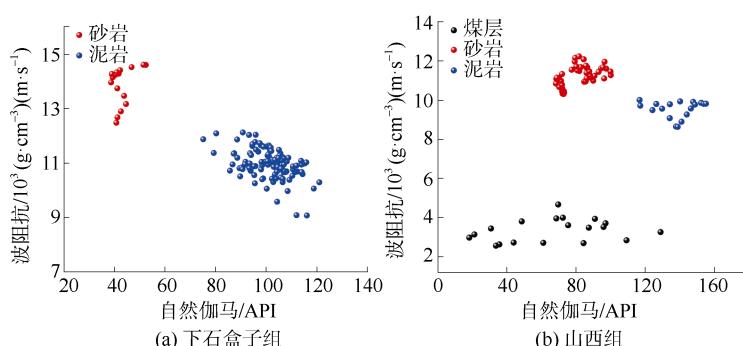


图2 不同地层自然伽马与波阻抗交会图

Fig.2 Cross plot of natural gamma and impedance in different formations

根据各个时段的自然伽马与波阻抗交会分析得到表1。预测岩层厚度的基本方法是统计每个CDP点该层波阻抗阈值以上(或以下)样点的个数,样点个数×采样率/2作为本层的时间厚度,再与岩层速度相乘得到岩层的厚度。

表1 岩层波阻抗范围统计

Table 1 Statistics of rock wave impedance

序号	岩层名称	波阻抗值范围/ $10^3(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	下石盒子组八段砂岩	≥ 12
2	山西组砂岩	≥ 10.5
3	本溪组砂岩	≥ 11
4	本溪组页岩	5~8

图3为区内主测线D1线下石盒子组八段-本溪组的岩性预测剖面图,图中分别标出了各地层砂、

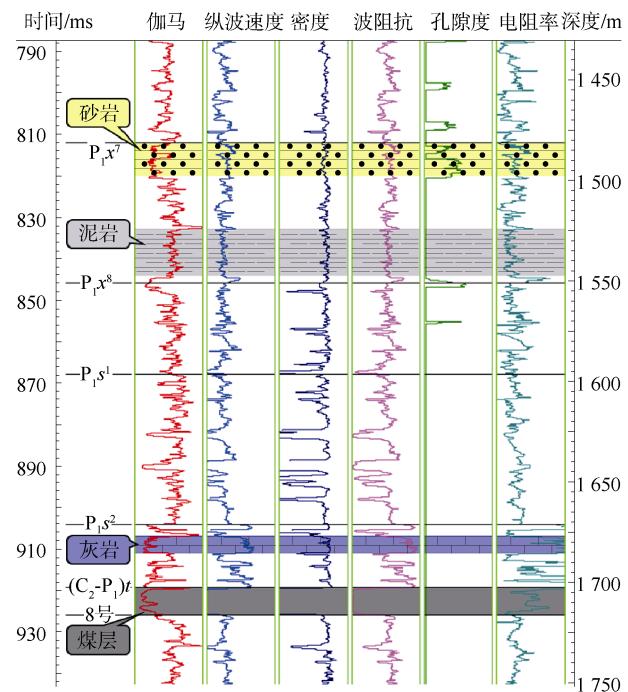


图1 T-01井各测井曲线相应特征示意图

Fig.1 Log characteristics corresponding to different lithologies in well T-01

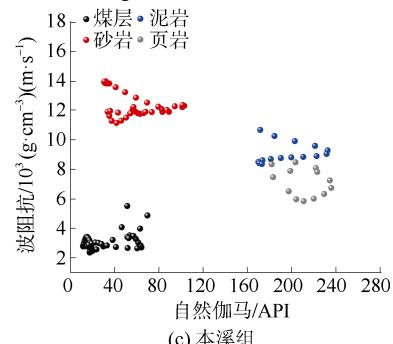


图3 区内主测线D1线下石盒子组八段-本溪组的岩性预测剖面图

页岩的位置,该图反映了下石盒子组八段、山西组和本溪组含气层的分布特征和厚度变化趋势。可以看出,D1线含气层整体埋深及厚度是西部大于东部。

2.3 叠前 AVO 反演及效果分析

通过测井资料对比,利用研究区内有含水饱和度的测井成果资料,分析该区含水饱和度与储层密度、声波时差和泊松比之间的关系,为储层含气性预测提供理论基础,图4为下石盒子组八段含水饱和度分别与声波时差、密度和泊松比的交会图。从图中可以看出,声波时差随含水饱和度的增大而减小,这意味着地层速度随含水饱和度的增大而增大,密度随含水饱和度的增大而增大,泊松比随含水饱和度的增大而减小。基于AVO可以得到截距和梯度属性,通过分析含气饱和度与AVO的关系,对储层含气性进行反演预测。

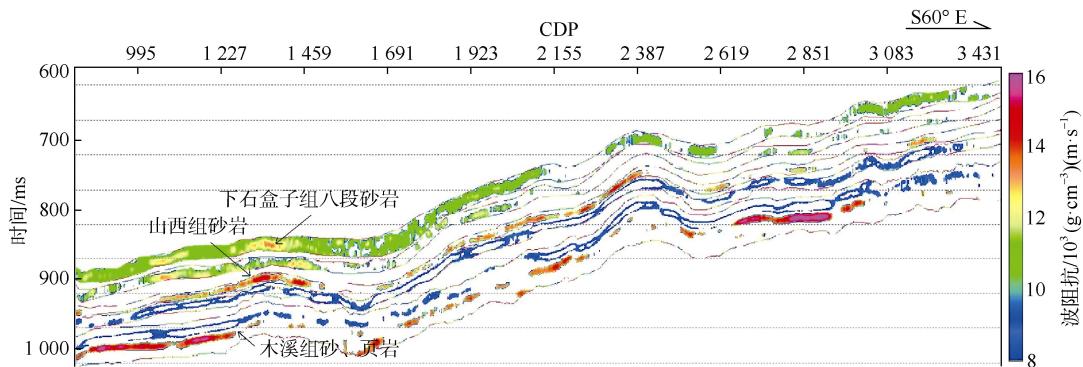


图 3 D1 线岩层厚度预测剖面(下石盒子组八段-本溪组)

Fig.3 Predicted section of lithologic thickness on survey line D1(eighth member of Lower Shihezi Formation-Benxi Formation)

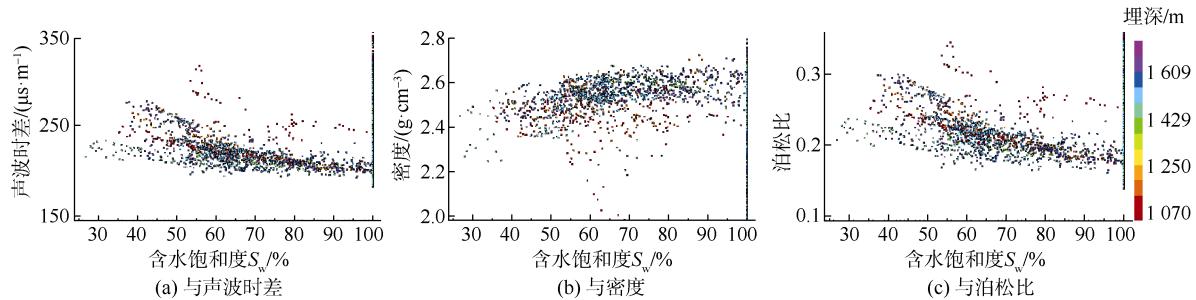


图 4 下石盒子组八段含水饱和度与弹性参数交会图

Fig.4 Cross plot of water saturation and elastic parameter in the eighth member of Lower Shihezi Formation

分析截距和梯度的变化规律，了解储层含量与 AVO 属性之间的关系。利用叠前 CRP 道集，提取了目的层的 AVO 截距 P 和梯度 G 属性。在分析了含气井与非含气井井旁道 AVO 响应特征的基础上，拟泊松比($P+G$)两种属性作为 AVO 流体因子敏感属性检测储层的含气性。提取井口位置的拟泊松比属性特征，认为有利含气区呈低拟泊松比特征。

2.4 储层含气量预测

通过以上对 AVO 属性和含气性之间的理论关系可知，储层 AVO 异常能反映区域含气量的大小，储层 AVO 异常越强，表明区域含气量越高；相反，

储层 AVO 异常越弱，表明区域含气量越低，因此，可以利用 AVO 理论来预测区域含气量：当储层含气量越大，拟泊松比值越小，储层含气量越小，拟泊松比值越大。图 5 为下石盒子组八段、山西组和本溪组等各测线拟泊松比属性图，图中冷色调代表拟泊松比值高，则含气量小；暖色调代表拟泊松比值低，则含气量大。

2.5 含气富集区预测

影响储层含气富集区分布的主要因素是储层含气饱和度和储层厚度，最终结合储层含气性和储层厚度对资源富集区进行了预测分析。

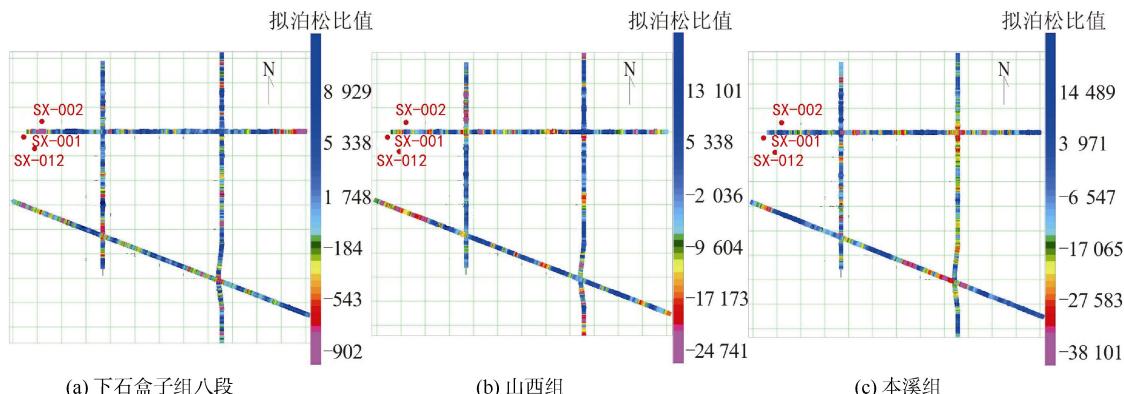


图 5 测区不同地层拟泊松比属性图

Fig.5 Pseudo-Poisson's ratio attribute graphs of different formation in the survey area

图6为下石盒子组八段、山西组、本溪组各测线拟泊松比属性与储层厚度趋势叠合图,根据低拟泊松比区域及储层厚度较厚区域划定各层含气有利区。主

测线D2线西侧小号头为下石盒子组八段资源富集区,主测线D2线西部和中部为山西组资源富集区,主测线D2线西北角为本溪组资源富集区。

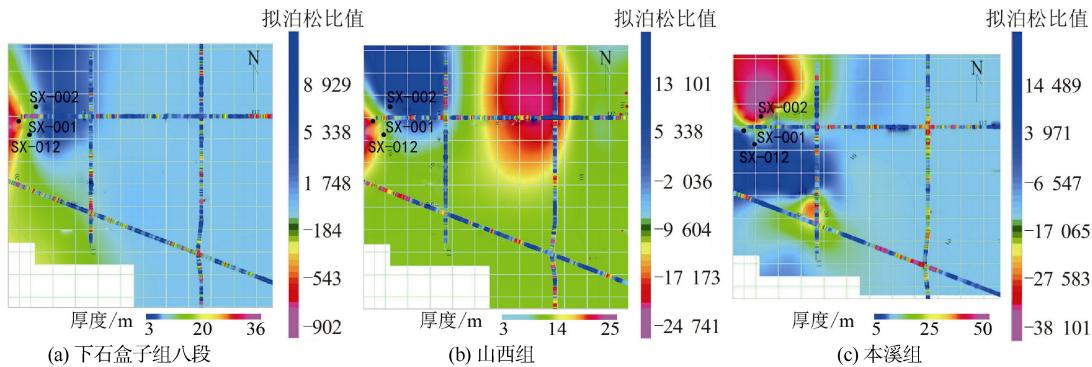


图6 测区不同组拟泊松比-砂岩厚度叠合图

Fig.6 Superimposed pseudo-Poisson's ratio-sandstone thickness of different formations in the survey area

2.6 预测区验证

D2线西侧施工了3个钻孔SX-001、SX-002和SX-012,其中SX-001和SX-012在下石盒子组八段、山西组和本溪组均见气,SX-002仅在本溪组见气。分析原因可能是主测线D2线区外的构造引起,SX-001和SX-012位于D2线南侧,SX-002位于D2线北侧,推测北侧区外有大的断层存在。3个验证孔均见气,验证效果较好。

3 结论

a. 以地震叠后资料及已知测井曲线为基础,通过叠后波阻抗反演技术,实现岩性预测;通过二维地震叠前道集AVO反演技术,实现了储层的含气性预测。结合二者得出低拟泊松比及储层厚度较厚区域可划定为各砂岩层和页岩层含气有利区。

b. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气地震勘探预测研究较多,此次针对煤系非常规气中砂岩气和页岩气利用地震勘探方法建立了系统的预测流程,该方法预测结果与钻孔揭露基本一致。

c. 实际资料应用表明,该方法在鄂尔多斯盆地东缘煤系非常规气富集区预测中具有一定的适用性,能够为其他区域煤系非常规气地震勘探预测提供借鉴。

参考文献

- [1] 吕振华,齐亚林,孟令涛.鄂尔多斯盆地西北部地区侏罗系成藏主控因素研究[J].新疆石油天然气,2016,12(1):19-24.
LYU Zhenhua, QI Yalin, MENG Lingtao. Factors of Jurassic reservoir master northwestern of Ordos basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2016, 12(1): 19-24.
- [2] 孙建博,姜呈馥,尹锦涛,等.鄂尔多斯盆地宜川地区煤层气
- 测线D2线西侧小号头为下石盒子组八段资源富集区,主测线D2线西部和中部为山西组资源富集区,主测线D2线西北角为本溪组资源富集区。
- 储层特征及勘探潜力分析[J].中国煤层气,2014,11(5):7-10.
SUN Jianbo, JIANG Chengfu, YIN Jintao, et al. Characteristics of CBM reservoirs and exploration potential in Yichuan region of Ordos basin[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(5): 7-10.
- [3] 张建军,刘红星,孙强,等.“两宽一高”地震采集技术在鄂东缘致密砂岩气藏勘探中的应用[J].石油地球物理勘探,2018,53(增刊2):1-7.
ZHANG Jianjun, LIU Hongxing, SUN Qiang, et al. Broadband, wide-azimuth and high-density seismic acquisition for the tight sand gas exploration in the east margin of Ordos basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(S2): 1-7.
- [4] 陈洋.四川盆地巫溪地区页岩气地震勘探关键技术应用研究[D].成都:西南石油大学,2017.
- [5] 曹代勇,刘亢,刘金城,等.鄂尔多斯盆地西缘煤系非常规气共生组合特征[J].煤炭学报,2016,41(2):277-285.
CAO Daiyong, LIU Kang, LIU Jincheng, et al. Combination characteristics of unconventional gas in coal measure in the west margin of Ordos basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 277-285.
- [6] LAW B E. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852.
- [7] 姚海鹏,朱炎铭,刘宇,等.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部煤系非常规天然气成藏特征[J].科学技术与工程,2018,18(3):160-167.
YAO Haipeng, ZHU Yanming, LIU Yu, et al. The accumulation features of unconventional gas in coal-bearing strata in the north of Yishan slope in Ordos basin[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (3): 160-167.
- [8] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002: 86(11): 1921-1938.
- [9] 隋峰堂,窦新钊.两淮煤田煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J].山西煤炭,2016,36(5):18-20.

- SUI Fengtang , DOU Xinzha. Systematic research and its significance of unconventional natural gas in coal measures in Huainan and Huabei coal fields[J]. Shan Xi Mei Tan , 2016 , 36(5) : 18–20.
- [10] 贾跃玮 , 王丹 , 魏水建 , 等. 金山气田致密砂岩储层含气性叠前地震预测方法研究[J]. 物探化探计算技术 , 2017 , 39(5) : 626–631.
- JIA Yuewei , WANG Dan , WEI Shuijian , et al. Study of pre-stack seismic prediction on Tight-sand reservoir gas-bearing of Jinshan gas field[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration , 2017 , 39(5) : 626–631.
- [11] 张虎. 兴城-丰乐地区深层三维地震资料精细解释及储层预测研究[D]. 西安 : 西安石油大学 , 2015.
- [12] 申有义 , 田忠斌 , 王建青 , 等. 地震非线性随机反演技术在煤层气储层厚度预测中的应用[J]. 煤田地质与勘探 , 2018 , 46(2) : 177–183.
- SHEN Youyi , TIAN Zhongbin , WANG Jianqing , et al. Application of seismic nonlinear stochastic inversion technique in prediction of CBM reservoir thickness[J]. Coal Geology & Exploration , 2018 , 46(2) : 177–183.
- [13] 赵胜天. 叠前 AVO 反演与属性分析[D]. 西安 西安石油大学 , 2008.
- [14] 史运华. 多波叠前 AVA 参数反演方法及精度分析[D]. 成都 : 成都理工大学 , 2010.
- [15] 原福堂 , 董红 , 朱再文 , 等. 地质统计随机反演与稀疏脉冲反演在储层预测中的应用对比[J]. 石油天然气学报 , 2014 , 36(7) : 55–60.
- YUAN Futang , DONG Hong , ZHU Zaiwen , et al. Application comparison between sparse spike inversion and geostatistical inversion in reservoir prediction[J]. Journal of Oil and Gas Technology , 2014 , 36(7) : 55–60.
- [16] 潘昱洁 , 李大卫 , 杨锴. 确定性反演和随机反演对井约束条件的需求分析[J]. 石油物探 , 2011 , 50(4) : 345–349.
- PAN Yujie , LI Dawei , YANG Kai. The requirement analysis about well constraint condition of deterministic inversion and inversion random[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum , 2011 , 50(4) : 345–349.
- [17] 左卫华. 测井约束 2D 地震反演预测煤层及上部砂岩厚度[J]. 工程地球物理学报 , 2018 , 15(2) : 181–188.
- ZUO Weihua. The prediction of coal seam and upper sandstone thickness using well logging constrained 2D seismic inversion technique[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics , 2018 , 15(2) : 181–188.
- [18] 解吉高 , 刘春成 , 刘志斌 , 等. 下刚果盆地北部中新统深水浊积岩储层及含油性地震预测[J]. 石油学报 , 2015 , 36(1) : 33–40.
- XIE Jigao , LIU Chuncheng , LIU Zhibin , et al. Seismic prediction of the reservoir and oil-bearing property of Miocene deep-water turbidite in northern Lower Congo basin[J]. Acta Petrolei Sinica , 2015 , 36(1) : 33–40.
- [19] 刘明全 , 肖为 , 冯全雄 , 等. 莺歌海盆地中深层高温高压河道砂岩储层含气性检测新方法[J]. 天然气工业 , 2016 , 36(6) : 30–35.
- LIU Mingquan , XIAO Wei , FENG Quanxiong , et al. A new gas-bearing detection method for medium and deep channel sand reservoirs under high temperatures and high pressures in the Yinggehai basin[J]. Natural Gas Industry , 2016 , 36(6) : 30–35.
- [20] 李龙龙 , 周创飞 , 张博 , 等. 胡尖山油田安 83 区块超低渗油藏井网适应性分析[J]. 石油化工应用 , 2013 , 32(3) : 51–54.
- LI Longlong , ZHOU Chuangfei , ZHANG Bo , et al. The oil-field safety Hujianshan 83 block of ultra-low permeability reservoirs well network adaptability analysis[J]. Petrochemical Industry Application , 2013 , 32(3) : 51–54.
- [21] 王建立 , 明君 , 夏同星 , 等. 弹性参数坐标旋转法在薄互储层定量描述中的应用[J]. 大庆石油地质与开发 , 2015 , 34(2) : 144–147.
- WANG Jianli , MING Jun , XIA Tongxing , et al. Application of elastic parameter coordinate rotation method in the quantitative characterization of the thin interbedded reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing , 2015 , 34(2) : 144–147.

(责任编辑 聂爱兰)