



准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测

徐茂轩, 杜文凤, 赫云兰, 杨峰

3D seismic prediction of low rank coalbed methane enrichment area in the southern margin of Junggar Basin

引用本文:

徐茂轩, 杜文凤, 赫云兰, 杨峰. 准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(5): 593–599.

您可能感兴趣的其他文章

1. 煤层气水平井钻井工程因素对煤粉产出影响的数值模拟——以柳林区块为例

引用本文: 魏迎春, 王亚东, 张劲, 等. 煤层气水平井钻井工程因素对煤粉产出影响的数值模拟——以柳林区块为例[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 670–679.

2. 煤层气井低产原因及二次改造技术应用分析

引用本文: 李勇, 胡海涛, 王延斌, 等. 煤层气井低产原因及二次改造技术应用分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(1): 55–70.

3. 基于地质统计学反演的透明化矿山岩性建模参数研究及应用

引用本文: 陈柏平, 崔凡, 刘波, 等. 基于地质统计学反演的透明化矿山岩性建模参数研究及应用[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(4): 427–436.

4. 基于地震属性的煤层裂隙发育带识别方法

引用本文: 李冬, 师素珍. 基于地震属性的煤层裂隙发育带识别方法[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(5): 425–431.

5. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层地应力状态及其对煤层气勘探开发的影响

引用本文: 李勇, 汤达祯, 孟尚志, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层地应力状态及其对煤层气勘探开发的影响[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(5): 416–424.

徐茂轩,杜文凤,赫云兰,等. 准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测[J]. 矿业科学学报,2023,8(5):593-599. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2023.05.001

Xu Maoxuan, Du Wenfeng, He Yunlan, et al. 3D seismic prediction of low rank coalbed methane enrichment area in the southern margin of Junggar Basin[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(5): 593-599. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.05.001

准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测

徐茂轩^{1,2}, 杜文凤², 赫云兰², 杨峰¹

1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;
2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

摘要:为深化煤层气资源潜力调查与评价,开展了准噶尔盆地南缘呼图壁区块三维地震勘探。地震数据采集针对宽方位、小道距和高覆盖次数目标设计,采用16L×6S×160R观测系统。地震数据处理针对复杂地貌野外静校正问题和陡倾角煤层成像精度要求高的技术难点,建立了高分辨率三维地震数据处理流程,以满足煤层气富集区预测需求。根据影响煤层气富集的主要地质因素(煤层埋深、断层特征、煤层厚度、煤层顶板岩性和煤层含气量等)定义了煤层气富集区划分原则和有利区分类模式。基于三维地震资料,将地震资料解释与地震属性分析相结合,利用地震岩性反演结果获得煤层厚度、煤层顶板岩性和煤层含气量信息。在钻孔约束下,进行了研究区B4煤层气富集区预测,提出了煤层气开发生产井部署建议。

关键词:准噶尔盆地南缘;低煤阶煤层气;富集成藏;三维地震预测

中图分类号:P 631

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2023)05-0593-07

3D seismic prediction of low rank coalbed methane enrichment area in the southern margin of Junggar Basin

Xu Maoxuan^{1,2}, Du Wenfeng², He Yunlan², Yang Feng¹

1. School of Mechatronics and Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China

Abstract: In order to investigate and evaluate the potential of CBM Resources in the southern margin of the Junggar Basin, this study conducted 3D seismic exploration in the Hutubi block. The seismic acquisition design tailors to wide azimuth, small receiver distance and high folds, the seismic geometry design includes 16 lines, 6 shots and 160 receivers. Given the serious static problems in mountainous terrain and imaging accuracy of steep dip coal seam in the seismic data processing, a high-resolution 3D seismic data processing flow is therefore established to meet the prediction requirement of coalbed methane enrichment area. The dividing principle of the coalbed methane enrichment area and the classification model of favorable area are proposed in line with the main seismic geological factors affecting coalbed methane enrichment, such as the coal seam depth, the faults characteristics, the coal seam

收稿日期:2023-02-24 修回日期:2023-03-15

基金项目:黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022YRUC010304);国家自然科学基金创新研究群体项目(52121003);国家重点研发计划(2021YFC3090303)

作者简介:徐茂轩(1991—),男,黑龙江鹤岗人,博士研究生,主要从事工程物探仪器和方法等方面的研究工作。Tel:010-62331305, E-mail: xmx@ student. cumt. edu. cn

通信作者:杜文凤(1963—),女,吉林扶余人,教授,博士生导师,主要从事三维地震勘探方法方面的教学与研究工作。Tel:010-62331305, E-mail: duwf@ cumt. edu. cn

thickness, the coal seam roof lithology and the coal seam gas content. Based on 3D seismic data, this study combined seismic data interpretation and seismic attribute analysis to obtain data on coal seam thickness, coal seam roof lithology, and coal seam gas content by using seismic lithology inversion results. Under the constraints of logging, this study made predictions of the B4 coalbed methane enrichment area in the research area, and put forward suggestions for deploying coal bed gas production borehole.

Key words: southern margin of Junggar Basin; low rank coalbed methane; accumulation and reservoiring; 3D seismic prediction

准噶尔盆地是西北地区主要聚煤盆地,煤层厚度大、层数多、煤阶低,具有典型低煤阶煤层气盆地特征。该盆地煤层气资源量大,其南缘煤层气显示活跃^[1]。针对准噶尔盆地南缘煤层气勘探目标优选和煤层气富集成藏规律等方面的研究,近年来开展了不少工作。王安民等^[2]提出了运用初步定性判断一定量评价研究一定性评价验证的思路进行煤层气选区评价方法;许婷等^[3]从资源条件、储层条件与保存条件出发,建立了适用于准噶尔盆地东南缘煤层气选区评价的数学模型;陈振宏等^[4]研究了准噶尔东南缘中低煤阶煤层气富集规律及成藏模式;李勇等^[5]基于对淮南地区构造、沉积、水文、物性和含气量分布的精细解剖,总结了煤层气富集成藏规律;孙斌等^[6]提出了准噶尔盆地深部煤层气综合勘探新思路,即煤层气与常规气相结合,以游离气为主、吸附气为辅,寻找保存条件好的圈闭进行勘探;汪新伟等^[7]研究了准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带的构造变换带特征;孙自明等^[8]在对准噶尔盆地南缘及邻区构造演化和对地震等地球物理资料分析的基础上,研究了该区中新界构造样式。这些研究成果为深入开展准噶尔盆地南缘煤层气富集区预测提供了重要参考依据。

国内有关学者还开展了煤层气富集区预测研究。彭苏萍等^[9]提出了基于地球物理信息融合进行高丰度煤层气富集区预测的方法;陈贵武等^[10]研究了高丰度煤层气富集区地球物理定量识别技术;李玉莹等^[11]开展了基于双模式反演方法的煤系地层顶底板岩性识别;陈勇等^[12]研究了基于主控因素的煤层气富集区地震预测技术及其应用。但是,有关准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测的研究鲜有报道。

为深化准噶尔盆地南缘煤层气资源潜力调查与评价,开展了三维地震勘探野外采集、山地地貌地震数据处理、地震资料解释、叠后波阻抗反演、自然伽马拟声波反演和叠前 AVO 反演,研究煤层埋深、断层特征、煤层厚度、煤层顶板岩性和煤层含气

量等影响煤层气富集的主要地质因素,实现对低煤阶煤层气富集区预测。

1 概况

1.1 勘探区位置

准噶尔盆地南缘呼图壁三维地震勘探区位于新疆呼图壁县城西南 70 km,北距大丰镇 50 km,东距乌鲁木齐市 95 km。勘探区东西长 3.0 km,南北宽 1.34 km,满覆盖面积 4.02 km²。

勘探区位于天山北麓,海拔高度为 1 190 ~ 1 790 m,最高海拔 1 952 m,属于高山区。勘探区总体上为南高北低。

根据地貌和实际探勘情况,将表层划分为黄土覆盖区和基岩出露区两个主要类型,前者占勘探区 60%,后者占 40%,表层地震地质条件一般。

1.2 区域地质概况

准噶尔盆地南缘位于准噶尔盆地与天山造山带结合部。区域出露地层由老至新依次为:石炭系中统前峡组(C_{2qx})、侏罗系下统八道湾组(J_{1b})、三工河组(J_{1s})侏罗系中统西山窑组(J_{2x})、头屯河组(J_{2t})、侏罗系上统齐古组(J_{3q})、喀拉扎组(J_{3k})、白垩系下统吐谷鲁第一亚群(k_{1tg^a})、第四系全新统冲洪积层(Q_{4^{al+pl}})、坡积层(Q_{4^d})。

地层总体为一南倾单斜构造,走向近东西,地层倾角 45° ~ 53°。含煤地层为中侏罗统西山窑组,含可采及局部可采煤层 7 层,煤层编号自下而上依次为 B₁、B₂、B₃、B₄、B₅、B₆ 和 B₇ 煤层。煤层变质程度普遍较低, R_o ≤ 0.7%, 以长焰煤、不黏煤和气煤为主,属于低煤阶类。

1.3 煤层

勘探区有钻井 1 口,即新呼参 1 井,位于测区中部偏西,钻探揭露的西山窑组煤层有 7 层,即 B₁ 到 B₇ 煤层,其中 B₄ 煤层最厚,为 19.50 m,如图 1 所示。从图 1 可以看出,煤层在测井曲线上表现为低伽马、低密度、低速度、高电阻率和低自然电位的特征。

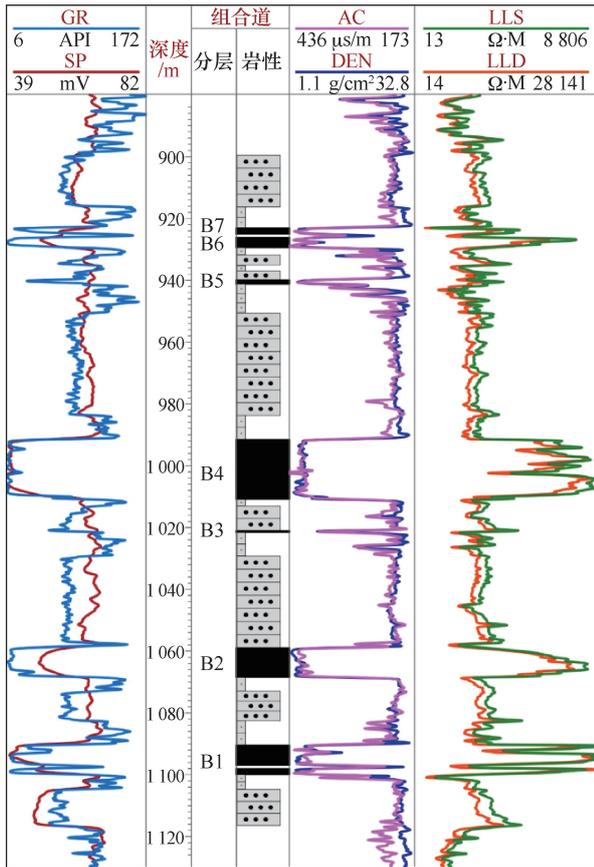


图1 西山窑组钻井综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive columnar of Xishanyao formation well

2 三维地震数据采集、处理与解释

2.1 三维地震数据采集

为实现基于三维地震预测煤层气富集区的目的,数据采集按照宽方位、小道距和高覆盖次数目标设计,采用16L×6S×160R观测系统,2个HT-5 Hz低频检波器组合接收,以提高目的煤层反射波的信噪比和分辨率。该区典型单炮记录如图2所示,图中矩形框内为目的煤层反射波。该数据采集为后续地震资料处理奠定了良好基础。

2.2 三维地震数据处理

通过对原始地震资料分析,结合煤层气富集资源条件,认为该区地震数据处理主要有2个难点:

(1) 静校正问题。本区大部分属于山地地貌,地表起伏剧烈,低速带变化快,野外静校正问题突出。能否准确地计算低速带模型参数,进而求取精确的野外静校正量,是影响处理质量的关键。

(2) 陡倾角煤层成像精度问题。本区主要目的煤层倾角陡,如何获取准确的速度,选取合理的偏移方法、确保煤层偏移成像效果,是数据处理的

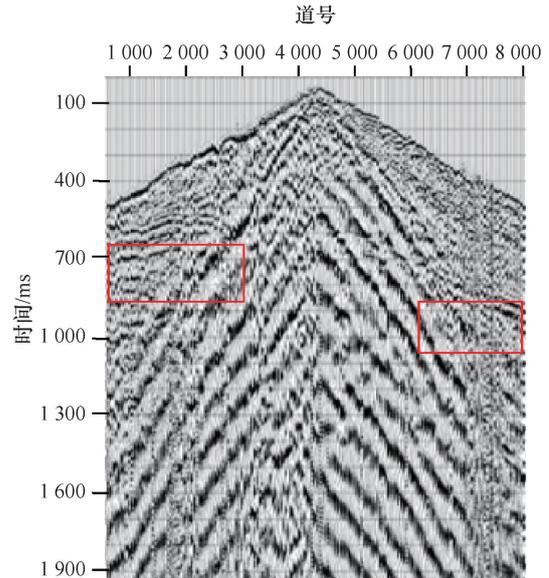


图2 典型单炮记录

Fig. 2 Typical seismic single shot recording

另一关键。

针对本区地震资料特点和数据处理难点,建立三维地震资料处理流程。针对静校正问题,处理前对常用的高程静校正、折射波静校正和层析静校正进行对比试验。为了保证测试的准确性,每种静校正都拾取了各自的叠加速度。通过对比,最终选用层析静校正方法。针对陡倾角煤层成像问题,采用克希霍夫三维叠前时间偏移方法,使用均方根速度模型计算三维旅行时间,具有偏移运算快、成像精度高的特点。该区叠前偏移地震剖面如图3所示,可见目的煤层反射波归位准确,剖面构造形态清晰,断点和断块清楚。

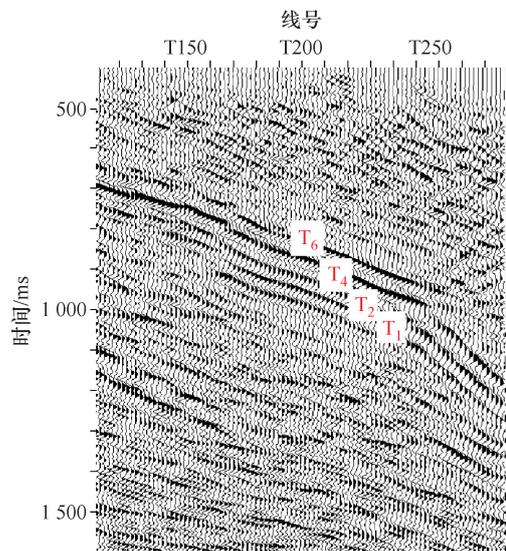


图3 叠前时间偏移剖面

Fig. 3 Pre-stack migration inline section

2.3 三维地震资料解释

层位标定是资料解释的基础。根据已知钻井合成记录,确定主要煤层 B₁、B₂、B₄ 和 B₆ 底板对应的标准反射波,自下而上分别用 T₁、T₂、T₄ 和 T₆ 表示,如图 4 所示。值得一提的是,由于 B₆ 和 B₇ 层间距小,实际上 T₆ 是 B₆ 和 B₇ 煤层的复合波,制作合成记录时将其视为 B₆ 煤层底板。

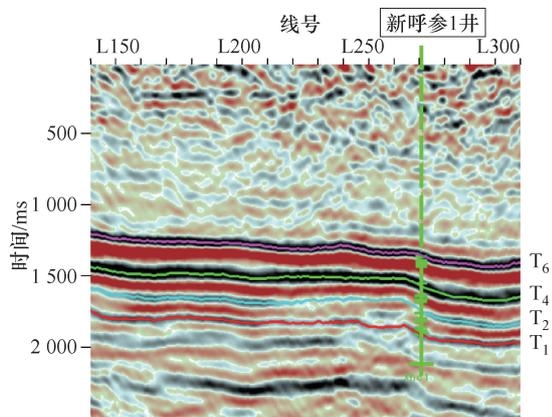


图 4 典型地震反射波剖面

Fig. 4 Standard reflection wave of main coal seam floor

在层位追踪的基础上,结合地震属性分析,可以获得主要煤层的断层展布特征。图 5 为 B₄ 煤层沿层最大波峰振幅属性与断层叠合,稳定煤层通常表现为强振幅(红色到绿色),而断层则表现为弱振幅条带(紫色到蓝色)。值得一提的是,矩形框为勘探区满覆盖范围。

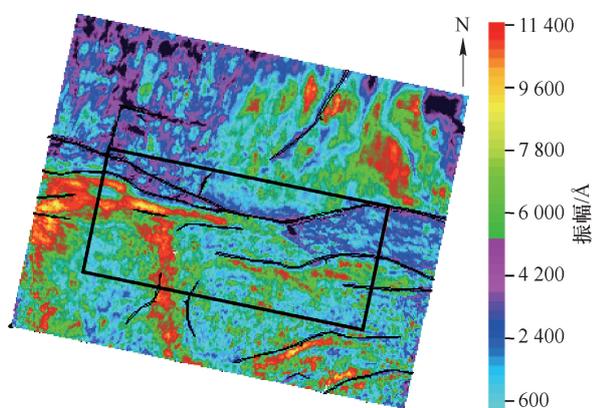


图 5 B₄ 煤层沿层最大波峰振幅属性与断层叠合图

Fig. 5 Maximum wave peak amplitude horizon attribute and fault overlapping graph of B₄ coal seam

本区共解释断层 9 条,其中正断层 3 条,逆断层 6 条;落差小于 3 m 的断层 1 条,落差大于 10 m 的断层 8 条。区内逆断层以 NEE 向为主,西侧断层落差小、延展短,东侧断层落差大、延展长。

3 煤层气富集的关键地质因素反演

3.1 煤层埋深与构造展布

已知钻井主要煤层分布特征,利用叠加速度体,以解释层位为约束条件,得到煤层速度平面分布,实现时深转换。

本区主要煤层产状为一单斜构造。以 B₄ 煤层为例(图 6),已知钻井处理深为 991.5 m,满覆盖范围内埋深 925 ~ 1 350 m,煤层倾角 45° ~ 60°。主要煤层埋深适中,位于煤层气运移指向区,且远离煤层甲烷风化带,有利于煤层气富集。西部及中部断层不发育,对煤层气富集有利。

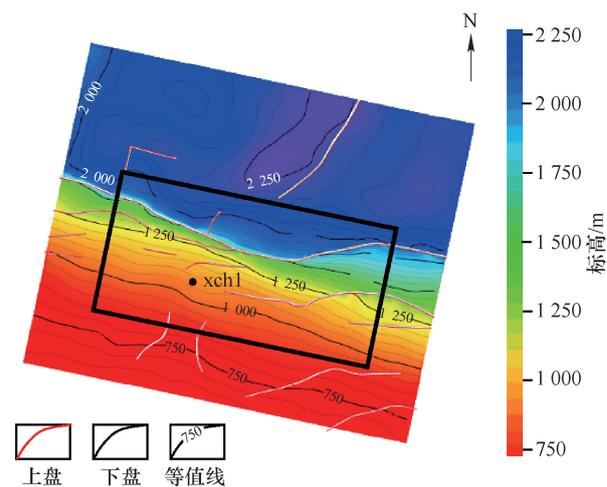


图 6 B₄ 煤层深度等值线

Fig. 6 Depth contour of B₄ coal seam floor

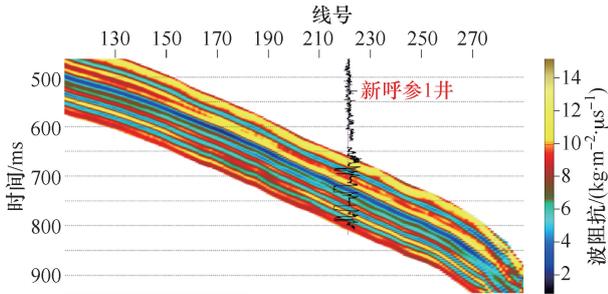
3.2 煤层厚度

根据叠后稀疏脉冲反演得到的波阻抗数据体,利用煤层低阻抗(图中蓝色)的特征,可以预测主要煤层厚度分布(图 7)。

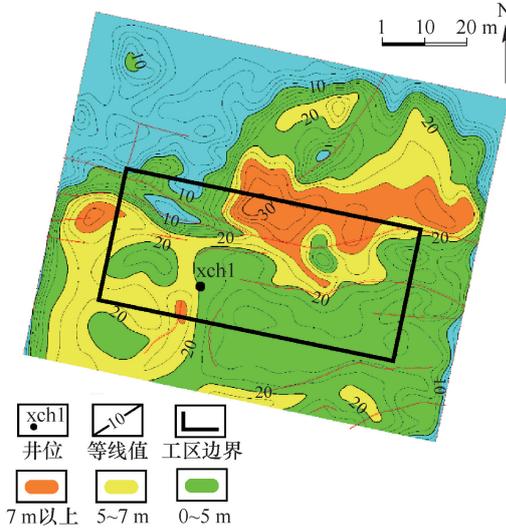
已知钻井处煤层厚度为 19.50 m,满覆盖范围内煤厚在 14 ~ 22 m 之间,总体上看北部厚、南部薄,西部厚、东部薄。B₄ 煤层厚度(图 7)与 B₄ 振幅属性(图 5)具有一定的相关性,煤层越厚振幅越强,进而验证了 B₄ 煤层厚度反演预测的可靠性。

3.3 煤层顶板岩性

针对砂岩、砂质泥岩和泥岩波阻抗差异小,使用叠后反演波阻抗数据难以进行岩性划分,利用数学方法将自然伽马曲线转换为具有声波量纲的自然伽马拟声波曲线,满足常规叠后反演应用条件。通过自然伽马拟声波反演方法^[13],发挥自然伽马曲线能够灵敏划分砂岩、泥岩和砂质泥岩的优势,可实现对煤层顶板岩性的预测。



(a) 过井叠后波阻抗反演剖面



(b) B₄煤层厚度分布

图7 基于叠后波阻抗反演预测煤层厚度

Fig. 7 Prediction of coal seam thickness based on post stack impedance inversion

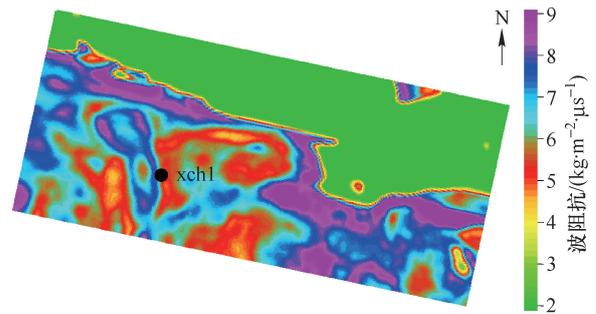
图8(a)为自然伽马拟声波反演 B₄ 煤层顶板波阻抗切片图,图8(b)为 B₄ 煤层顶板岩性分布图。已知钻井处 B₄ 煤层顶板为泥岩和砂质泥岩,厚度为 5.50 m,本区北部主要为砂岩,对煤层气保存不利,南部主要为砂质泥岩和泥岩,有利于煤层气保存。

3.4 煤层含气量

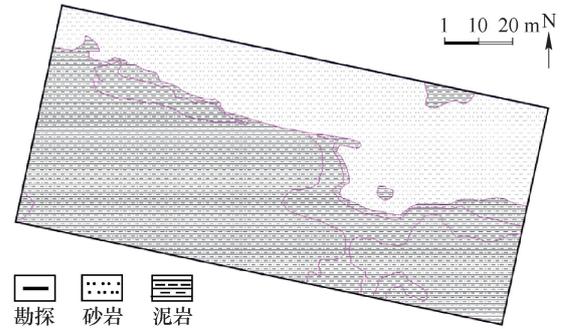
叠前振幅随炮检距变化(AVO)反演是预测煤层含气量的重要方法^[14-16]。基于叠前 AVO 反演得到的截距和梯度属性,如图9(a)所示,与煤层含气量建立相关关系,可以进行煤层含气量预测。已知钻井处 B₄ 煤层含气量为 13.72 m³/t,根据叠前 AVO 反演预测的 B₄ 煤层含气量分布在 8.57 ~ 15 m³/t 之间,如图9(b)所示,可见 B₄ 煤层含气量总体较高。

3.5 研究区煤层气富集区划分原则

综合分析,煤层埋藏深、断层不发育、煤层厚度大以及煤层顶板泥岩厚,有利于煤层气的富集。根据煤层埋深、断层特征、煤层厚度、煤层顶



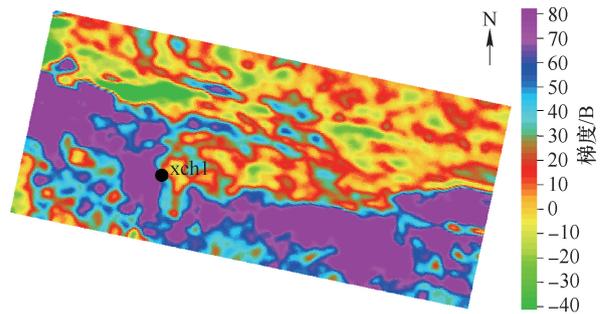
(a) B₄煤层顶板波阻抗切片



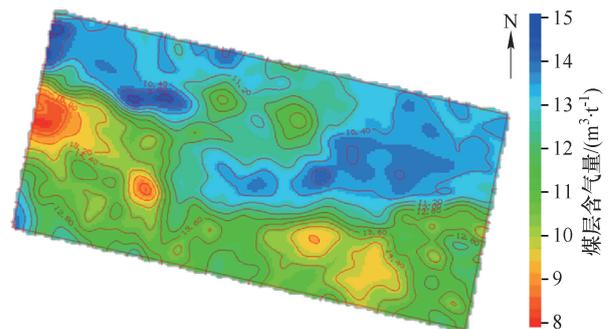
(b) B₄煤层顶板岩性分布

图8 基于自然伽马拟声波反演的 B₄ 煤层顶板岩性分布

Fig. 8 Roof lithology distribution of B₄ coal seam based on natural gamma pseudo acoustic inversion



(a) B₄煤层梯度-截距切片



(b) B₄煤层含气量分布

图9 基于叠前 AVO 反演的 B₄ 煤层含气量预测

Fig. 9 Gas content prediction of B₄ coal seam based on pre-stack AVO inversion

板岩性和煤层含气量等影响煤层气富集的主要地质因素资料,确立研究区煤层气富集区划分原则为:同时满足煤层厚度大于5 m、煤层含气量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 、煤层埋深分布在700~1 600 m之间、顶板岩性为砂质泥岩或泥岩以及具有强地震振幅属性的区域,为煤层气富集区。

根据此划分原则,可将煤层气富集区按不同模式进行有利区定性分类:煤层埋深相对较浅、面积较大以及断层较少的区域,定义为I类煤层气有利区;煤层埋深较大、面积较小以及断层较多的区域,定义为II类煤层气有利区。

4 煤层气富集区预测

依据煤层气富集区划分原则和有利区分类模式,对本区煤层气富集区进行了预测。 B_4 煤层煤层气富集区分布如图10所示,可见西侧和东侧各分布1个煤层气富集区。

西侧煤层气富集区面积为 0.89 km^2 ,煤层厚度在18~24 m之间,含气量大于 $12 \text{ m}^3/\text{t}$,煤层埋深在760~1 310 m之间,煤层顶板为砂质泥岩。这一区域为I类煤层气有利区。

东侧煤层气富集区面积为 0.34 km^2 ,煤层厚度在16~20 m之间,煤层含气量为大于 $12 \text{ m}^3/\text{t}$,煤层埋深为960~1 360 m之间,其顶板为砂质泥岩。这一区域为II类煤层气有利区。

煤层气开发生产井建议部署在煤层气富集区内,I类煤层气有利区是井位部署首选,II类煤层气有利区作为备选。

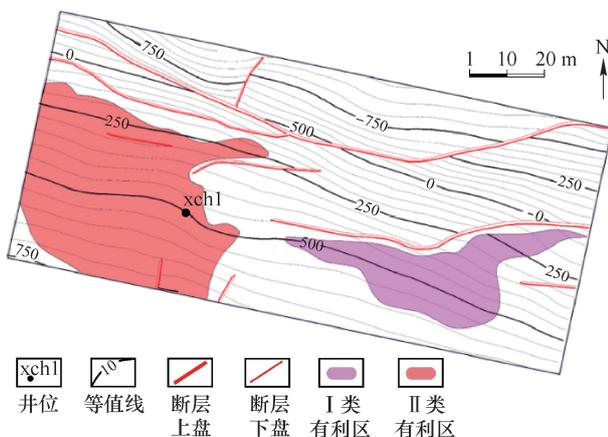


图10 B_4 煤层煤层气富集区

Fig. 10 Coalbed methane enrichment area in B_4 coal seam

5 结论

本文基于三维地震法,根据影响煤层气富集的

主要地质因素,对研究区 B_4 煤层气富集区开展预测研究。结论如下:

(1) 野外数据采集采用16L×6S×160R观测系统,通过宽方位、小道距和高覆盖次数采集,提高了地震资料采集质量。针对山地形貌静校正严重和陡倾角煤层成像精度要求高的技术难点,开展了高分辨率三维地震资料处理,目的煤层反射波归位准确、断点和断块清晰,满足煤层气富集区预测需求。

(2) 在地震资料解释的基础上,开展了叠后波阻抗反演、自然伽马拟声波反演和叠前AVO反演,基于反演结果,预测出煤层厚度、煤层顶板岩性和煤层含气量等影响煤层气富集的主要地质因素。

(3) 利用主要地震地质因素,确立了研究区煤层气富集区划分原则。将同时满足煤层厚度大于5 m、煤层含气量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 、煤层埋深分布在700~1 600 m之间、顶板岩性为砂质泥岩或泥岩以及具有强地震振幅属性的区域,确定为煤层气富集区。

(4) 根据煤层气富集区划分原则和有利区分类模式,对研究区 B_4 煤层进行了煤层气富集区预测和煤层气有利区圈定。提出了将I类煤层气有利区作为井位部署首选的建议,为煤层气开发提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 崔思华,刘洪林,王勃,等. 准噶尔盆地低煤级煤层气成藏地质特征[J]. 现代地质,2007,21(4):719-724.
Cui Sihua, Liu Honglin, Wang Bo, et al. Trapping characteristics of coalbed methane in low-rank coal of Junggar Basin[J]. Geoscience, 2007, 21(4): 719-724.
- [2] 王安民,曹代勇,魏迎春. 煤层气选区评价方法探讨:以准噶尔盆地南缘为例[J]. 煤炭学报,2017,42(4):950-958.
Wang Anmin, Cao Daiyong, Wei Yingchun. Discussion on methods for selected areas evaluation of coalbed methane: a case study of southern Junggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 950-958.
- [3] 许婷,伏海蛟,马英哲,等. 准噶尔盆地东南缘煤层气勘探目标优选[J]. 特种油气藏,2017,24(2):18-23.
Xu Ting, Fu Haijiao, Ma Yingzhe, et al. Selection of CBM exploration targets in southeastern margin of Junggar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 18-23.
- [4] 陈振宏,孟召平,曾良君. 准噶尔东南缘中低煤阶煤层气富集规律及成藏模式[J]. 煤炭学报,2017,42(12):3203-3211.

- Chen Zhenhong, Meng Zhaoping, Zeng Liangjun. Formation mechanism and enrichment patterns of middle-low rank coalbed methane in Southern Junggar Basin, China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3203-3211.
- [5] 李勇, 曹代勇, 魏迎春, 等. 准噶尔盆地南缘中低煤阶煤层气富集成藏规律 [J]. 石油学报, 2016, 37(12): 1472-1482.
- Li Yong, Cao Daiyong, Wei Yingchun, et al. Middle to low rank coalbed methane accumulation and reservoiring in the southern margin of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1472-1482.
- [6] 孙斌, 杨敏芳, 杨青, 等. 准噶尔盆地深部煤层气赋存状态分析 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 195-202.
- Sun Bin, Yang Minfang, Yang Qing, et al. Analysis on occurrence state of deep coalbed methane in Junggar Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 195-202.
- [7] 汪新伟, 汪新文, 马永生. 准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带的构造变换带特征 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 345-354, 394.
- Wang Xinwei, Wang Xinwen, Ma Yongsheng. Characteristics of structure transform zones in the fold-thrust belts on the southern margin of Junggar Basin, Northwest China [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(3): 345-354, 394.
- [8] 孙自明, 何治亮, 牟泽辉. 准噶尔盆地南缘构造特征及有利勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 216-221.
- Sun Ziming, He Zhiliang, Mou Zehui. Structural features and favorable exploration areas in southern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 216-221.
- [9] 彭苏萍, 杜文凤, 殷裁云, 等. 高丰度煤层气富集区地球物理识别 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1398-1403.
- Peng Suping, Du Wenfeng, Yin Caiyun, et al. Geophysical identification of high abundance coalbed methane rich region [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1398-1403.
- [10] 陈贵武, 董守华, 吴海波, 等. 高丰度煤层气富集区地球物理定量识别技术研究与应用 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2151-2156.
- Chen Guiwu, Dong Shouhua, Wu Haibo, et al. Research and application of quantitative geophysics recognition in high abundance of coalbed methane-rich region [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2151-2156.
- [11] 李玉莹, 刘笑颜, 谷剑英, 等. 基于双模式反演方法的煤系地层顶底板岩性识别: 以寺河矿区3号煤层为例 [J]. 矿业科学学报, 2018, 3(6): 515-520.
- Li Yuying, Liu Xiaoyan, Gu Jianying, et al. Identification of roof and floor lithology of coal measures strata based on double modes inversion method: a case of No. 3 coal seam in Sihe mining area [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(6): 515-520.
- [12] 陈勇, 陈洪德, 关达, 等. 基于主控因素的煤层气富集区地震预测技术应用研究 [J]. 石油物探, 2013, 52(4): 426-431, 334.
- Chen Yong, Chen Hongde, Guan Da, et al. Application of coalbed methane accumulation zone seismic prediction technology based on main geological controlling factors [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4): 426-431, 334.
- [13] 师素珍, 孙超, 魏文希, 等. 联合反演在煤层顶底板岩性预测中的应用 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 338-341.
- Shi Suzhen, Sun Chao, Wei Wenxi, et al. Joint inversion in the application of coal seam roof and floor lithologic prediction [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 338-341.
- [14] 彭苏萍, 杜文凤, 殷裁云, 等. 基于AVO反演技术的煤层含气量预测 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1792-1796.
- Peng Suping, Du Wenfeng, Yin Caiyun, et al. Coal-bed gas content prediction based on AVO inversion [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1792-1796.
- [15] 孙斌, 杨敏芳, 孙霞, 等. 基于地震AVO属性的煤层气富集区预测 [J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 15-18, 122.
- Sun Bin, Yang Minfang, Sun Xia, et al. Prediction of coalbed methane enrichment zones based on AVO attributes [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 15-18, 122.
- [16] 师素珍, 谷剑英, 郭家成, 等. 顾桂矿区活断层三维地震解释及其发育特征研究 [J]. 矿业科学学报, 2019, 4(4): 292-298.
- Shi Suzhen, Gu Jianying, Guo Jiacheng, et al. Study on 3D seismic interpretation and development characteristics of active faults in Gugui mining area [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(4): 292-298.

(责任编辑: 陈贵仁)