

利用地震地质资料综合研究 X 凹陷煤系地层分布

张锦伟,赵志刚,梁建设

(中海油研究总院,北京 100027)

摘要:Y组的煤系源岩是X凹陷天然气的重要源岩,准确预测其分布对于科学地评价X凹陷天然气勘探前景具有重要意义。在充分消化吸收前人工作成果的基础上,针对存在的主要问题,通过对井区煤层组进行岩石物理分析,确定能区分煤层与围岩的测井序列,从正演模拟研究出发,对煤系地层的地球物理响应特征进行分析,结合属性分析等技术手段,进行煤系地层地质特征的地球物理识别,综合运用岩心、测井、地球化学、古生物等资料,分析凹陷的成煤环境,对煤系地层的分布进行预测。经研究,认为X凹陷的西北部是Y组煤系地层最有利发育区,为富煤区所在,以多属性回归分析技术为代表的地震属性分析技术系列可以较好地预测薄煤层组合的分布规律。

关键词:煤系地层;测井序列;地球物理响应;地震属性;多属性回归

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2011)01-0157-07

引用格式:张锦伟,赵志刚,梁建设.利用地震地质资料综合研究X凹陷煤系地层分布[J].天然气地球科学,2011,22(1):157-163.

0 引言

X凹陷位于东海陆架盆地,目前已经证实Y组的煤系烃源岩是X凹陷天然气的重要源岩,经烃源岩热模拟累计气产量与 R_0 对应关系分析认为,煤系源岩产烃率要远大于非煤系源岩。X凹陷目前现有钻井分布不均且钻达Y组地层的较少,煤层薄,有的钻井测井有煤层响应但录井却没有显示;此外,前人对Y组沉积相的认识也存在很大差异,这些因素导致Y组煤系烃源岩的分布存有争议。因此,准确预测X凹陷内Y组煤系地层的平面厚度分布情况,对于科学认识和评价该凹陷天然气勘探前景具有重要意义。

1 研究方法

本文研究在充分消化吸收前人工作成果的基础上,针对研究区存在的主要问题,采取“广泛调研、优选技术、井区解剖、综合预测”的研究思路,综合利用地震地质资料、地球物理手段来对X凹陷内煤系地层的分布进行多手段、全方位的预测。目前利用地

震属性来研究煤层分布特征及其沉积环境的方法和技术比较成熟^[1-3],相应地在我国海域流体活动研究^[4]、油气勘探前景分析^[5]、特殊储层展布规律^[6-7]等领域的研究中,地球物理方法得到了广泛的运用。笔者旨在从正演模拟研究出发,结合属性分析等技术手段,对煤系地层的地球物理响应特征进行综合分析,并设计了相应的技术路线及综合研究流程(图1)。

(1)通过岩石物理分析确定能够区分煤层与围岩的测井序列,为煤系地层地球物理技术优选奠定基础。

(2)从正演出发,对煤系地层的地球物理响应特征进行分析,结合反演预测、地震属性分析等技术手段,选取切合研究区Y组煤系地层地质情况的地球物理识别技术。

(3)综合运用岩心、测井、地球化学及古生物等方面的资料,通过国内外第三系的大型煤成气田或煤田煤的分布模式和形成环境的调研与对比,对X凹陷Y组沉积环境类型进行综合分析,在此基础上,与构造背景结合,对Y组沉积相分布特征进行预测,进而对

Y 组煤系地层的成煤环境进行综合分析。

(4)采用优选的地球物理技术,结合沉积环境分

析结果,对研究区煤系地层的分布进行预测,为该区天然气勘探前景评价提供科学依据。

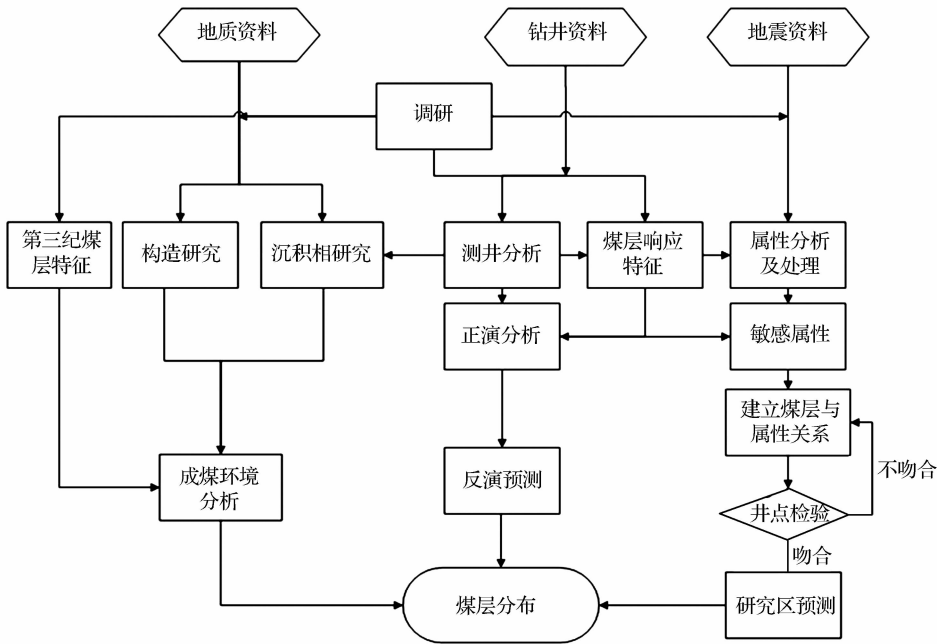


图 1 综合研究流程

2 研究应用

2.1 聚类分析方法解释测井相,选择敏感曲线

测井相又叫电相,就是用以反映沉积岩岩性特征,并能将不同沉积岩区分开的一组特定的测井参数集。一般来说,同一沉积环境中某类岩性的地层具有一组特定的测井参数值(包括测井响应值和从测井资料中提取的与岩性有关的信息),而该测井参数值对应同一类岩性地层的概率是很大的。因此可用测井资料将整个钻井剖面的地层划分为若干具有地质意义的测井相,再通过与岩屑录井、岩心分析等地质资料的详细对比,确定每个测井相的岩相类型。为了提高测井曲线间对比的质量和自动化程度,减少人为干预,本文研究运用 Geoframe 软件的 Litho Toolkit 模块中的聚类分析(针对地层曲线形态对比的计算机自动分层)方法,利用不同的岩性具有不同的测井响应特征的规律,对研究区 16 口井进行测井相划分。

运用 Litho Toolkit 模块划分测井相有 3 个关键步骤:敏感曲线的选择、测井相种类数的确定和测井相标定。

(1)我们根据研究区目标井的测井曲线特征将其分成 6 类岩相,如 X-1 井,其测井响应特征见表 1 和图 2。在不同的岩性相中自然电位曲线和井径曲线对岩性的变化不敏感,而自然伽马曲线(GR)、电

阻率曲线(RT)、密度曲线(DEN)、中子孔隙度曲线(CN)与声波时差曲线(AC)对变化较敏感。因此,通过做 GR-AC、CN-DEN、AC-DEN、CN-AC 和 GR-RT 的交会图,可以识别不同的岩性,即不同的岩相在不同的区域中的分布特征(图 3)。

表 1 X 凹陷不同岩相对应测井特征

岩相类型	自然伽马	自然电位	井径	电阻率	密度	中子	声波
岩相 1	低值	无异常	正常	中等,深中电阻率有明显差异	低值	低值	中等
岩相 2	高值	无异常	正常	中等,深中浅电阻率重合	较高	高值	中等
岩相 3	中等	无异常	正常	中等	较高	低值	中等
岩相 4	低值	无异常	正常	高值	低值	低值	低值
岩相 5	高值	无异常	高值	中等—低值,深浅电阻率差异大	低值	高值	高值
岩相 6	低值	无异常	高值	中等—低值,深浅电阻率差异大	低值	高值	高值

通过以上的分析我们得到划分测井相的敏感曲线,排在第一位的为自然伽马曲线,第二位的为声波时差、密度和中子三孔隙度曲线,第三位为电阻率曲

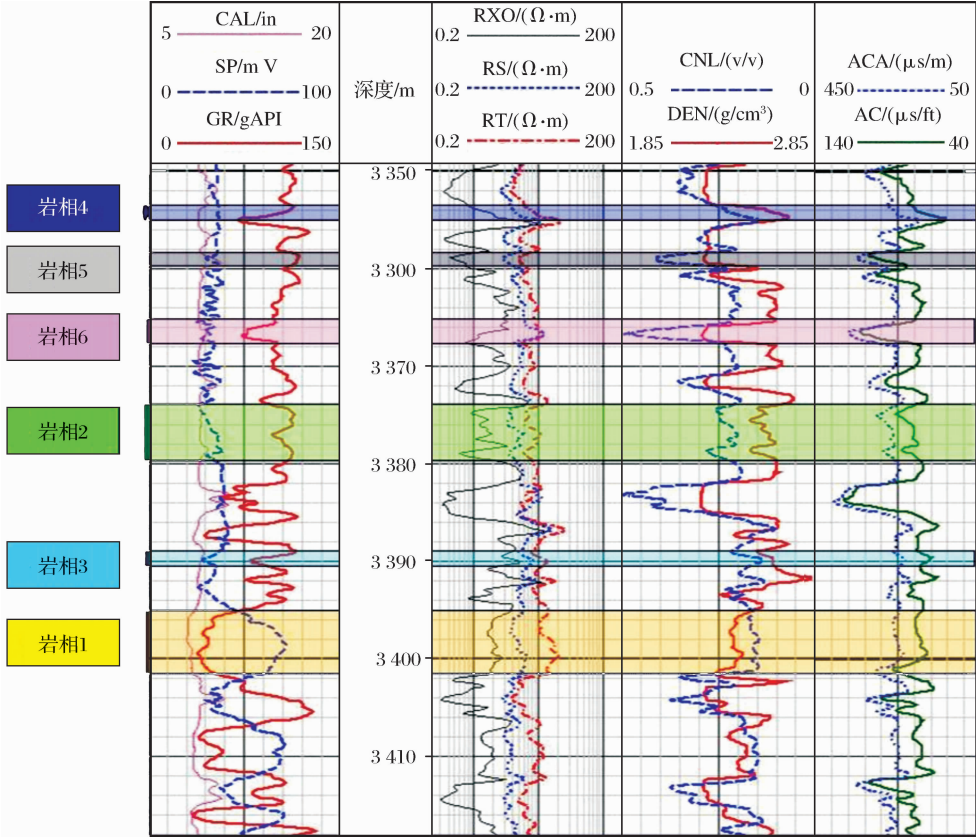


图 2 X-1 井 Y 组地层测井响应特征分析

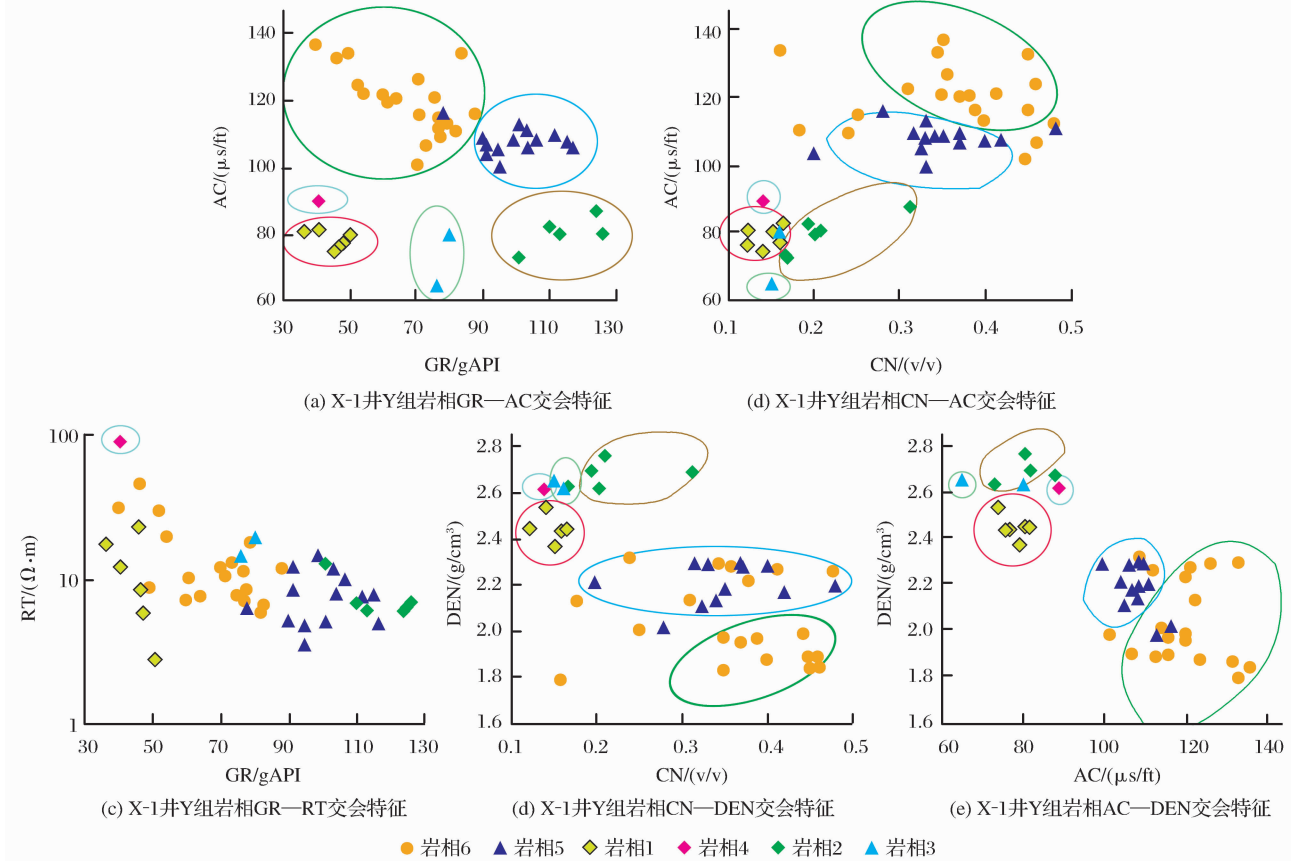


图 3 X-1 井 Y 组不同岩相测井曲线交会特征

线,自然电位曲线和井径曲线不敏感。我们将自然伽马曲线、三孔隙度曲线和地层真电阻率曲线作为本文划分测井相的敏感曲线。

(2)测井相标定的关键在于根据已知井的岩心分析、地质录井和测井等资料建立准确的测井相—

岩相的对应关系。以 X-2 井为例,根据岩心资料,结合录井对所划分的不同测井相类型进行标定,划分出的 5 种测井相分别对应:砂岩相、泥岩相、砂质泥岩相、灰质砂岩相和煤相,建立了测井相与岩相良好的对应关系(图 4)。

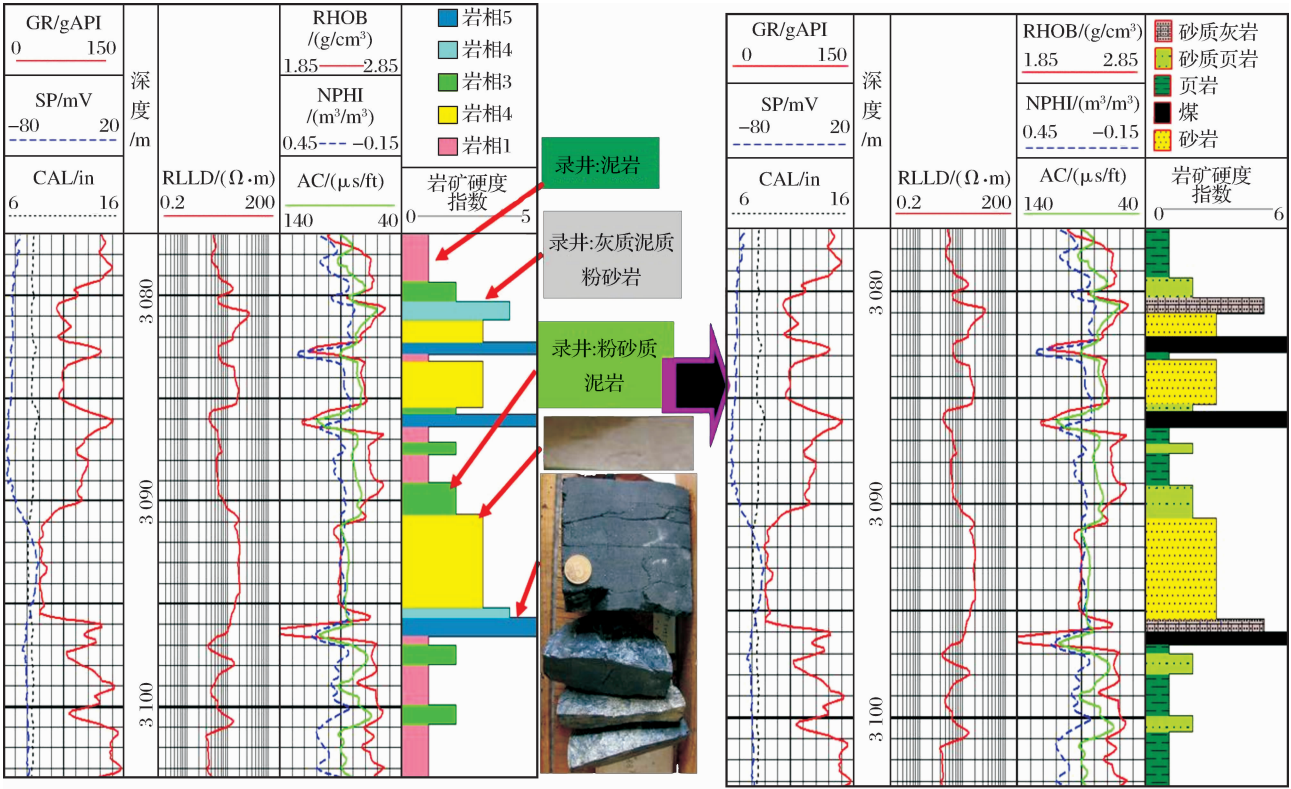


图 4 X-2 井岩心标定

表 2 X-3 井 Y 组煤层综合解释

序号	井段/m	厚度/m	GR/gAPI	SP/mV	CAL/in	RHOB/(g/cm³)	NPHI/(m³/m³)	DT/(μs/ft)	COAL	测井解释结论	录井解释	地球化学指标	
												深度/m	TOC/%
1	3 401.0 3 402.3	1.3	100.3	13.4	15.1	2.34	0.4	115.0	1	2 类可疑煤层			
2	3 413.9 3 414.3	0.4	87.8	9.3	14.1	2.34	0.3	98.0	1	2 类可疑煤层			
3	3 447.0 3 447.7	0.7	105.6	11.9	15.0	2.29	0.3	111.0	1	2 类可疑煤层		3 453.0	8.3
4	3 487.8 3 479.9	1.1	118.9	17.7	14.5	2.28	0.3	107.0	1	2 类可疑煤层		3 473.0	14.0
5	3 481.6 3 482.7	1.1	95.0	14.8	15.1	2.26	0.3	131.0	1	2 类可疑煤层	沥青质煤	3 490.0	67.7
6	3 611.9 3 612.5	0.6	107.9	11.5	14.4	2.43	0.3	102.0	1	2 类可疑煤层		3 612.0	6.5
7	3 622.2 3 623.1	0.9	131.5	18.3	13.9	2.29	0.3	102.0	1	2 类可疑煤层			
8	3 625.5 3 626.4	0.9	136.7	17.0	14.0	2.37	0.3	93.0	1	2 类可疑煤层		3 632.0	15.2
9	3 667.1 3 667.5	0.4	85.0	19.9	13.9	2.27	0.3	102.0	1	2 类可疑煤层	沥青质煤		
10	3 670.1 3 670.7	0.6	112.6	15.8	13.6	2.28	0.3	98.0	1	2 类可疑煤层	沥青质煤	3 672.0	62.5
11	3 758.3 3 759.2	0.9	107.0	16.4	14.5	2.43	0.3	108.0	1	2 类可疑煤层		3 744.0	52.6
12	3 761.6 3 762.4	0.8	111.0	17.0	15.3	2.44	0.3	126.0	1	2 类可疑煤层		3 764.0	13.6
13	4 310.2 4 311.8	1.6	95.0	25.0	14.0	2.04	0.1	69.0	1	Probably	煤条带, 质轻、较疏松、污手、可燃	4 310.0	4.6
14	4 326.5 4 328.3	1.8	57.0	25.0	12.0	2.00	0.1	82.0	1	Probably			
15	4 340.0 4 341.5	1.5	97.0	25.0	16.0	2.30	0.2	68.0	1	Probably			
合计		14.6							15				

在同为煤的岩心中测井响应也有高自然伽马和低自然伽马之分,说明确实有 2 种不同类型的煤系存在,即之前划分的岩相 5 和岩相 6 都统一划成了煤系地层。由于岩相 6 为典型的煤层,而岩相 5 为可疑煤层,同时根据录井、地球化学资料,岩相 5 部分录井解释为沥青质煤,且地球化学指标 $\text{TOC}>40\%$,而其余也都达到了炭质泥岩的标准(表 2)。因此,我们将岩相 6 划分为 I 类(可靠煤层)煤系地层,岩相 5 解释为 II 类(煤层和炭质泥岩,以后者为主)煤系地层。

通过对研究区 16 口井 Y 组煤层的综合解释,X 凹陷 Y 组煤层累积厚度较大,平均每口井钻遇煤层厚度为 16.9 m,单层厚度多在 0.3~1.2 m 之间,最大累积厚度为 50.6 m,煤层+炭质泥岩最大累积厚度达 75.8 m。

3.2 利用地震属性预测煤地比^[1-2]

由于研究区煤层单层厚度大部分在 2 m 以下,通过对研究区 15 口井选取不同频率的雷克子波进行单煤层一维正演模拟,分析认为识别单煤层的雷克子波主频最小需要达到 40Hz。因此,在目前地震资料的情况下,通过提高频率来识别单煤层的方法

不可行。那么,是否可以通过地震属性来识别煤层组呢?通过瞬时频率、反射强度与均方根振幅等属性来分析单井薄煤层组合与其围岩之间的地球物理响应关系,夹有煤层处的地震反射振幅随煤层厚度增大,振幅强度增强。

在单井一维正演模拟的基础上,我们设计了煤系地层二维正演模型,模型中煤层速度为 2 800 m/s,泥岩速度为 3 500 m/s,砂岩速度为 4 100 m/s,通过正演模拟属性分析表明,振幅和频率类的部分属性与煤地比具有较好的相关性(图 5),煤泥互层模型中煤地比与总能量、均方根振幅(RMS)、最大波峰振幅成正比。因此可利用这些敏感属性通过单属性或多属性的线性回归来分析预测煤系地层的分布。

在正演结论的指导下,从选取的 12 口钻井的已知煤地比出发(表 3),用井点的煤地比作为因变量,相应井点的属性作为自变量进行交会,求出形如 $Y=a\times X+b$ 一元线性或 $Y=a_1\times X_1+a_2\times X_2+a_3\times X_3+\cdots+b$ 的多元线性回归公式,推出整条过井或井旁地震测线信息,然后通过测线网络达到推出研究区煤地比的目的。

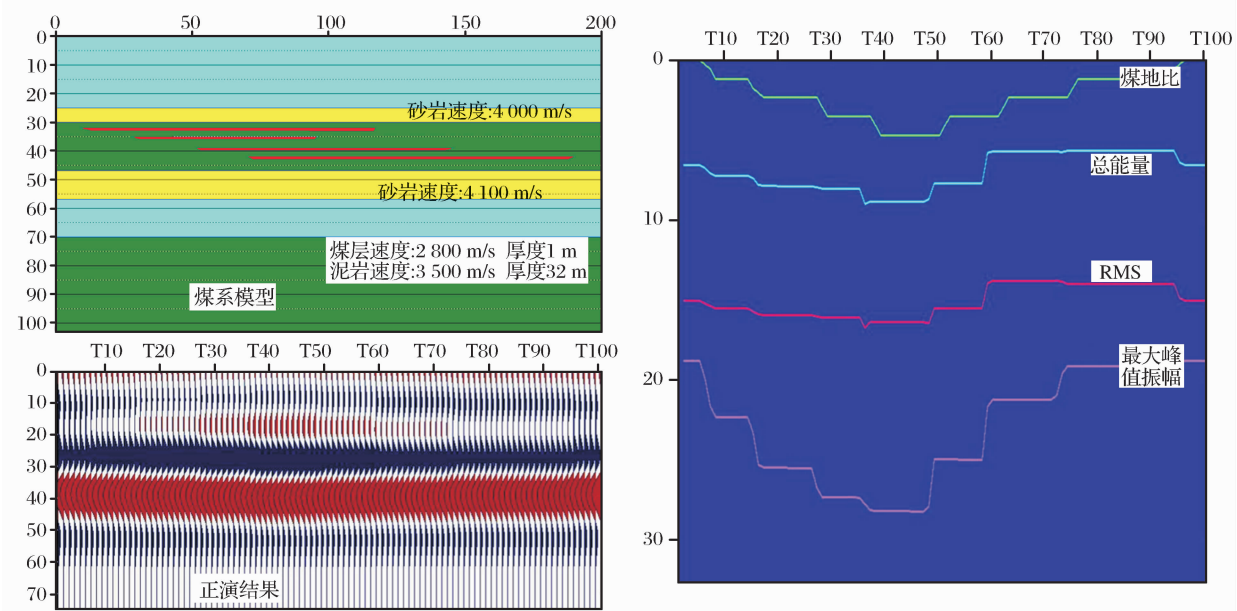


图 5 煤系模型二维正演属性分析

表 3 钻井煤地比统计(单位:%)

	X-5	X-1	X-6	X-7	X-8	X-9	X-10	X-4	X-3	X-11	X-2	X-12
Y 一上段	6.77	6.2	5.18	3.61	2.97	5.86	8.56	4.77	1.78	8.17	8.66	4.94
Y 一下段	7.98	8.29	5.57	5.53	3.67	11.03	11.12	0.68	3.22	5.23	3.17	2.07
Y 二上段	8.31	8	10.86	3.18	3.5	5.57	10.65	0	—	—	—	—
Y 二下段	4.65	11.29	3	1.44	3.14	1.58	11.87	0.46	—	—	—	—
Y 三上段	11.39	18.33	2.61	2.24	5.15	4.36	8.97	0	—	—	—	—
Y 三下段	10.98	7.78	4.36	1.43	2.41	2.97	5.16	0	—	—	—	—

采用单属性线性回归的数学方法预测与实测的煤地比平均误差为 1.63%，而多属性线性回归方法预测与实测的煤地比平均误差为 0.74%。因此，本文研究采用后者进行煤地比预测，预测平面上煤层厚度大于 20 m 的面积分别为：Y 组一段，9 078 km²；Y 组二段，4 097 km²；Y 组三段，2 657 km²（图 6）。X 凹陷西

北部是 Y 组煤系地层最有利发育区，为富煤区所在，西南及东北部也存在局部较有利煤系地层发育区。

为了检验预测结果的精度，我们将 X-4 井设为检验井，其 Y 组一段实测煤层厚度为 5.45 m，预测为 5.08 m，误差在可接受范围内，说明本文研究采用的方法可行。

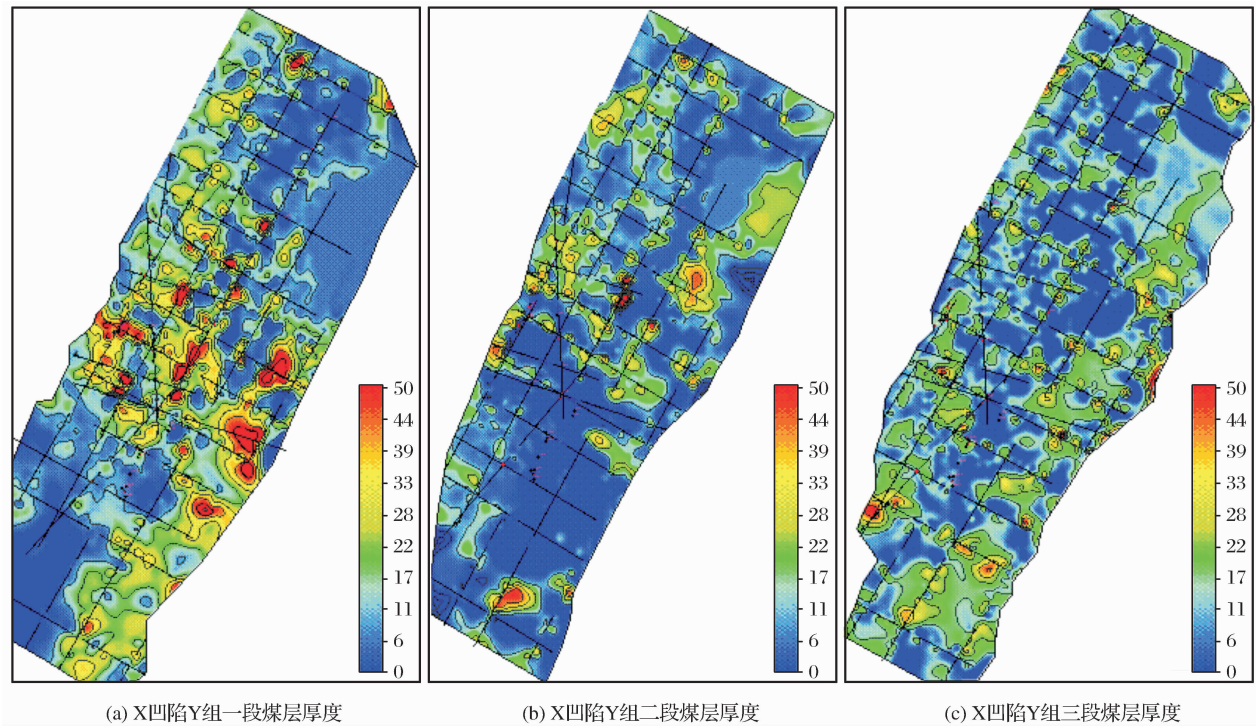


图 6 X 凹陷 Y 组各段预测煤系地层厚度

2.3 Y 组沉积相分布特征及其成煤环境

综合岩心、测井、地球化学及古生物等资料，结合国内外第三系的大型煤成气田或煤田资料的调研，预测 Y 组沉积相分布特征，并分析 Y 组煤系地层的成煤环境。

(1)第三系煤田分布虽然极广，但严格地受古气候、古构造和古地理条件的控制。北纬 35°~60°是北半球第三系的潮湿气候带位置，当时该气候带的温度适中，属暖温带，且雨量丰沛，以致整个带都有利于煤的聚积，从世界第三系煤田分布图也可看出此带是煤的聚积中心。而 X 凹陷正好处于西环太平洋的聚煤带上，其煤系地层发育特征与国内珲春煤田和国外巴拉巴丹煤田相似，均有地层厚度大、煤层层数多但单层厚度小、稳定性差的特征^[3]。

(2)从古生物资料分析来看，Y 组早期的孢粉组合表明被子植物占优势，优势种群是杨梅科，可以推断这个时期的气候属于较潮湿的亚热带气候，广泛分布着常绿阔叶林，林下生长着以水龙骨科为主的

蕨类植物，Y 组晚期发生了新的变化，表现为蕨类植物比早期繁盛，金沙科蕨类大量发展，反映了湿热气候，以产三沟、三孔沟花粉为代表的热带、亚热带频繁出现，植物组合更加复杂，说明地貌趋于复杂化。

(3)化石资料分析认为，X 凹陷 Y 组下伏地层顶部见少量海相沟鞭藻，为陆相沉积环境，Y 组中下部海相沟鞭藻较发育，同时见少量钙质超微化石，为海相沉积背景，盘星藻在 Y 组晚期相对更发育，Y 组上部为陆相湖泊沉积环境。

(4)地球化学资料的微量元素 B 在 Y 组平均为 $72 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ ，低于正常海相沉积物，高于陆相沉积物，Sr/Ba 在 Y 组平均为 0.23，低于正常海相沉积物，但明显高于 Y 组上覆沉积物。

(5)岩心资料可见 Y 组砂岩中发育有代表潮坪沉积的羽状交错层理、潮间坪沉积的双粘土层，还存在具冲刷侵蚀面的潮下砂坪—潮间坪沉积。

上述资料都表明 X 凹陷 Y 组沉积时期，植物繁盛，气候湿热，为海岸平原—潮坪相或海湾—三角洲

平原相沉积,利于成煤。据沉积相研究,X 凹陷西北部 Y 组一段为海陆过渡相沉积,发育煤系地层,此与采用地震多属性线性回归方法预测煤层厚度图的结果相吻合。

3 结论

(1)通过此次地震地质资料的综合研究,X 凹陷的西北部是 Y 组煤系地层最有利发育区,为富煤区所在,西南及东北部也存在局部较有利煤系地层发育区。

(2) 利用测井相聚类分析方法能够有效识别煤层;煤地比与地震属性之间具有良好的相关性,地震属性分析技术可以较好地预测薄煤层组合的分布规律;多属性回归分析技术可以有效地提高煤层组合总厚度的预测精度,以该技术为代表的技术系列可以用于钻井较少、地震资料较差地区的煤层分布预测。

参考文献:

[1] Meng Zhaoping, Guo Yansheng, Pan Jienan, *et al.* Prediction model for coal bed thickness based on seismic attribute and its application[J]. Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 23-26. [孟召平,郭彦省,潘结南,等.基于地震属性的煤层厚度预测模型及其应用[J].地球物理学报, 2006, 49(2): 23-26.]

[2] Wang Yonggang, Le Youxi, Zhang Junhua. Analytical Techniques Using Seismic Attributes[M]. Beijing: Press of China University of Petroleum, 2006. [王永刚,乐有喜,张军华.地震属性分析技术[M].北京:中国石油大学出版社, 2006.]

[3] Wang Ju, Wang Baiyou. Depositional and accumulation features of lower coal-bearing layer in Hunchun coalfield[J]. Jilin Geology, 2004, 23(2): 18-22. [王举,王佰友.珲春煤田下含煤段沉积与聚煤特征[J].吉林地质, 2004, 23(2): 18-22.]

[4] Mao Yunxin, He Jiaxiong, Zhang Shulin, *et al.* Origin and geophysical features of thermal fluid activity in Changnan mud diaper in Yinghai basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 108-114. [毛云新,何家雄,张树林,等.莺歌海盆地泥底辟带昌南区热流体活动的地球物理特征及成因[J].天然气地球科学, 2005, 16(1): 108-114.]

[5] He Jiaxiong, Xia Bin, Shi Xiaobin, *et al.* Progress in deep water oil and gas exploration and prospect in China South Sea exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 747-752. [何家雄,夏斌,施小斌,等.世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景[J].天然气地球科学, 2006, 17(6): 747-752.]

[6] Gao Jianhu, Yong Xueshan, Liu Hong. Study on frequency tract technique for reservoir prediction[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 808-812. [高建虎,雍学善,刘洪.频率域储层预测技术研究[J].天然气地球科学, 2007, 18(6): 808-812.]

[7] Wang Zhongde, Wang Xinhai, Wang Jinfang, *et al.* Lower resitance reservoir features and its evaluation method[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 390-393. [汪忠德,王新海,王锦芳,等.低电阻率油气储集层特征和评价技术研究[J].天然气地球科学, 2008, 19(3): 390-393.]

An Integrated Study on Coal Measure Distribution in X Sag Based on Seismic and Geologic Data

ZHANG Jin-wei, ZHAO Zhi-gang, LIANG Jian-she

(Research Center of Exploration Institute of CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: The coal measure source rock in Y Formation is one of the important source rocks in X sag, the distribution of which is critical in assessing exploration prospect of X sag. Based on previous work, our study aimed at principal problems to analyze the petrophysical characteristics of the coal bed. The logging series that could be used to separate the coal bed from the wall rock was defined with forward modeling. The geophysical response of coal measure was analyzed by combining with seismic attribute analysis. In addition, the geological characteristics of the coal measure was recognized through the geophysics characteristics by integrating the core, well log, geochemical and palaeontology data to analyze the coal forming environment in the sag and the distribution of coal measure. The northwest of X sag is believed as the favorable areas that developed the coal measure in Y Formation and rich in coals. The analysis technique of seismic attribute represented by multiple-attribute regression is suitable for the prediction of the coal measure distribution.

Key words: Coal measure; Logging series; Geophysical response; Seismic attribute; Multiple-attribute regression.