

川西坳陷须五段页岩气藏地震各向异性

徐天吉^{1,2}, 闫丽丽³, 程冰洁⁴, 唐建明^{2,5}, 李曙光^{1,2}, 杨振武^{1,2}

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院物探三所, 四川成都 610041; 2. 中国石化多波地震技术重点实验室, 四川成都 610041; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059; 4. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059; 5. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610041)

摘要:川西坳陷须(须家河组)五段天然气资源量巨大,具有良好的勘探开发远景;但地质认识程度低,尤其针对气藏各向异性的研究极少。为了提高储层预测精度和井位部署成功率,针对须五段开展各向异性研究,有利于进一步认识须五段储层特征并深入分析天然气聚集规律。通过早期研究发现,受四川盆地须五时期的沉积环境控制,川西坳陷须五段形成了以厚泥页岩和薄致密砂岩为主体的岩性组合,页岩层横向变化大,加之页岩矿物成分、碎屑颗粒定向排列、周期性薄层沉积及其他非均质特性,导致了地层展现出各向异性特征。目前,分析预测地层空间各向异性的有效方法并不多,且大多数方法仍然以地震数据为基础:通过分析地震反射及分方位地震属性对岩石类型、物理性质及构造形态等特征的直观响应,实现岩层各向异性指示信息的准确提取。相比较而言,如果不采用分方位地震数据,而仅基于全方位叠加地震数据的各向同性分析方法,则忽视了页岩的各向异性本质,不利于地质问题的准确认识。文中采用上述方法思路,基于分方位与全方位叠加地震数据,对比分析了这两类数据的地震反射响应特征、曲率体属性、相干体属性和储层阻抗等参数,并在地震各向异性信息的指示下捕捉岩层空间变化特征,成功地实现了川西须五段气藏沉积相、岩性、裂缝的精细解释和“甜点”储层的高精度预测。

关键词:各向同性;各向异性;全方位;分方位;页岩气;须家河组五段;川西坳陷

中图分类号:T631.4

文献标识码:A

Seismic anisotropy of shale gas reservoirs in the 5th member of the Xujiahe Formation in western depression of Sichuan BasinXu Tianji^{1,2}, Yan Lili³, Cheng Bingjie⁴, Tang Jianming^{2,5}, Li Shuguang^{1,2}, Yang Zhenwu^{1,2}

(1. No. 3 Geophysical Research Branch of Exploration & Production Institute, Southwest Oil & Gas Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Key Laboratory of Multi Wave Seismic Technology, Branch SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 5. Southwest Oil & Gas Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The huge gas potential in the 5th member of the Xujiahe Formation has made it one of the hottest exploration targets in China. However, the formation has not been well explored and many geological “mysteries” remained unsolved— anisotropy of the gas reservoirs there is one of them. A research was carried out on the anisotropy to better understand the reservoirs features and accumulation patterns, so as to improve the precision of reservoir prediction and success rate of well drilling. Previous study shows that the member had been controlled by sedimentary environment and formed lithologic assemblage dominated by thick mudstone and shale and thin tight sandstone. Looking horizontally, the shale varies dramatically and shows strong anisotropy due to complicated mineral combination, directional alignment of detrital grains, cyclic veneer and other heterogeneous features. There have had no effective method for analyzing and predicting the anisotropy so far. Available methods are mostly based on seismic data to obtain anisotropy information of rocks through analyses of seismic reflection and the direct responses of azimuth attributes upon rock types, physical features and structure configurations. Comparatively speaking, anisotropy feature of shale formations is likely to be ignored by isotropy analyses based solely on stacked wide-azimuth seismic data. By combining both the azimuth and wide-azimuth stacked seismic data, we compared and analyzed the seismic reflection responses, curvature attributes, coherence attributes and impedances of the

收稿日期:2014-06-23;修订日期:2015-02-01。

第一作者简介:徐天吉(1975—),男,高级工程师,石油物探。E-mail: xu_tianji@126.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41204071);国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2013AA064201);国家自然科学基金联合基金项目(U1262206)。

two sets of data, and then captured features of reservoir space under the guidance of the anisotropy information. A fine interpretation of sedimentary facies, lithology and fracture of the reservoirs and an accurate prediction of sweet spots in the member were then achieved by applying the above-mentioned method and data yield from it.

Key words: isotropy, anisotropy, wide-azimuth, azimuth, shale gas, 5th member of the Xujiahe Formation, western Sichuan Basin

四川盆地是上扬子地块的次一级构造单元,中、新生代以来多期深断裂运动使其形成了呈菱形的大型构造;并在早印支抬升过程中,大规模海侵运动结束,海相沉积环境转化为内陆湖相沉积环境,最终形成了大型内陆湖盆^[1]。燕山运动时期,在四川盆地内部,形成了以“三隆三拗”为主体的构造格局,即龙门山山前古隆起、川中古隆起、华蓥山古隆起和川西拗陷、川北拗陷和川鄂拗陷^[2]。

川西拗陷是位于四川盆地西部的地壳下降构造,主要发育上三叠统、侏罗系、白垩系、古近系、新近系等地层。其中,上三叠统由下至上,主要发育马鞍塘组、小塘子组和须家河组,经历了海相、海陆过渡相和陆相等正常退覆沉积^[3]。燕山期形成的古隆起构造促进了油气富集和次生气藏的产生^[2],在川西拗陷上三叠统,天然气资源量达到了 $345.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4],形成了以须(须家河组)二段和须四段为主的致密砂岩深盆气藏;须三段和须五段则是重要的烃源岩,主要发育厚度较大的暗色泥页岩,有机质丰度高(残余有机碳含量为 $1.1\% \sim 2.7\%$)^[4],热成熟度适中,生烃能力较强。总体而言,在须家河组烃源层系中,须五段烃源岩厚度最大、分布面积最广,是侏罗系油气藏最重要的烃源贡献岩层^[5-6]。

在川西须五段,物源供给主要来自西部的龙门山和北部的米仓山—大巴山;沉积中心位于德阳—彭州一带。须五段与下伏须四段整合接触,与上覆下侏罗统白田坝(自流井)组不整合接触,主要发育辫状河三角洲和湖泊沉积体系,区内最厚地层超过700 m。须五段页岩地层横向分布广阔、纵向较厚,为有机质的储集和天然气的聚集创造了有利条件。近期储量评估与实钻结果揭示,川西须五段天然气资源量超过 $7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中页岩气资源量大于50%,具有较好的勘探开发远景。

1 须五段地质与地球物理概况

四川盆地在须五段沉积时期,物源供给主要来源于川西北、川东南和川西南。川西北物源由双鱼石—老关庙—柘木场一带进入盆地,川西南物源由合川—阳高寺一带进入盆地,形成了川西拗陷以滨浅湖为主、由北向南依次发育三角洲平原、三角洲前缘和滨浅湖

的地质沉积格局^[7]。

在印支运动晚幕,川西须五段沉积基准面逐渐抬升,湖水位不断上涨,在最大湖泛面时期形成了滨浅湖最大扩张区域。横向上,地层厚度由沉积中心(德阳—彭州一带)向四周逐渐减薄,在汉旺、都江堰西部地区出现了地层缺失,在成都、中江等区域地层厚度达到40~500 m。纵向上,依据初次湖泛面、最大湖泛面及测井、生物化学特征等关系,须五段可以划分为上、中、下3个亚段,主要发育灰黑色—深灰色泥页岩、灰色—深灰色粉(细)砂岩以及“富泥型”、“富砂型”和“互层型”3类优势岩性组合。

川西须五段3类优势岩性组合代表了区内典型的优质储层类型。钻井与岩心测试分析显示,组成这些储层的岩石整体十分致密:页岩平均孔隙度为2.37%(图1);粉砂岩平均孔隙度为4.26%;砂岩平均孔隙度为6.31%。页岩粘土含量约35.7%,脆性矿物含量约64.3%;平均有机碳含量(TOC)为2.35%,有机质类型以腐殖型(Ⅲ型干酪根)为主;热成熟度 R_o 值介于0.71%~2.41%,以成熟—高成熟阶段为主。页岩平均含气量为 $1.85 \text{ m}^3/\text{t}$,砂岩平均含气量为 $0.71 \text{ m}^3/\text{t}$,表明非常规页岩气是川西须五段的主力资源。

此外,川西须五段页岩裂缝比较发育。构造缝是川西须五段泥页岩中的主要裂缝类型,其常常发育在褶皱构造转折端和断裂附近。井下电成像测井显示(图2b)须五段低角度缝较发育,倾角主要集中在 $0 \sim 20^\circ$,局部发育斜交缝。层间页理缝在川西须五段页岩中也十分常见(图2a),是在较强水动力条件下由一系列薄层页岩产生的,其力学性质薄弱,极易剥蚀破碎,张开度也较小,易被充填。但是,在砂质或其他碎屑含量较高

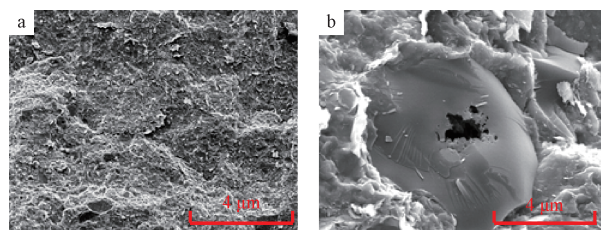


图1 川西拗陷须家河组五段页岩样品微观孔隙扫描照片
Fig. 1 Scan photos of micro-pores of shale samples from the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin
a. HF-1井,埋深3 059 m,泥晶孔隙;b. HF-1井,埋深3 059 m,晶间孔、微孔隙

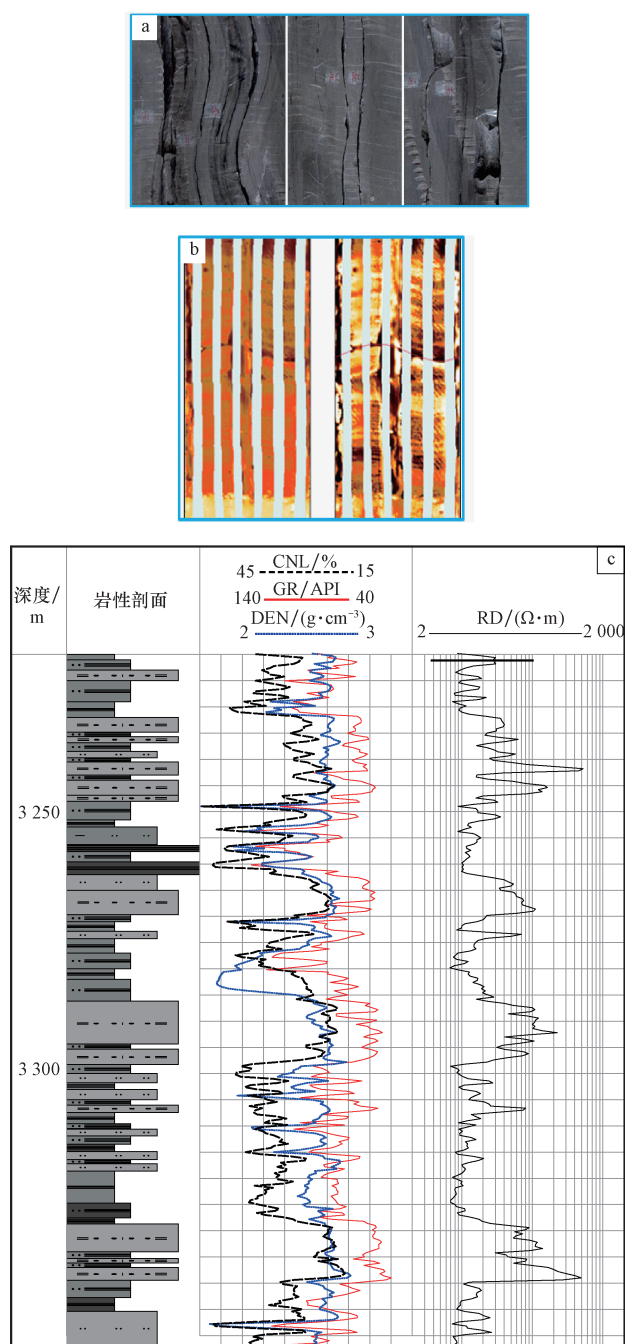


图2 川西坳陷 HF-2 井须五段页岩岩心照片(a)、天然裂缝成像测井(b)和常规测井(c)

Fig. 2 Photo of cores(a), curves of image logging(b) and conventional logging(c) of natural fractures from the Well HF-2 of the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

CNL. 补偿中子孔隙度; GR. 自然伽马;

DEN. 密度; RD. 深侧向电阻率

的页理面上,页理缝也可能张开;尤其在与其高角度构造缝连通时,能够形成有利于页岩气解吸、运移和聚集的裂缝网络空间。在页岩气开发过程中,最初形成的天然气流主要来自于较大型的裂缝网络中的游离气;之后,储存在微裂隙(如页理缝)、有机孔隙和岩石骨架孔隙中的吸附气和游离气则是主要气源。因此,裂缝网络系统不仅能为吸附气的解吸提供空间,还能为游

离气的渗流提供运移通道或存储空间,是决定页岩气井能否获得高产的关键因素。图3所示为基于地震最大曲率和相干属性预测的川西须五段 S2 层裂缝分布情况。由图可见,在该层东部,围绕较大断裂(蓝色箭头所指),伴生了高密度裂缝带;在西部,除了较大裂缝外,曲率和相干属性显示的微裂缝异常(红色虚线框内)分布并不广泛。

再则,就川西须五段地球物理响应特征而言,页岩地层具有高伽马(GR)、高声波时差(AC)、高电阻率(RD)和低密度(DEN)等测井响应特征(图2c)。在地震剖面上,可以见到前积反射、丘形反射、透镜反射等地震响应特征(图4a)。在地震阻抗平面图上(图4b):页岩体现为低纵波阻抗,主要分布在中部;砂岩则为高纵波阻抗,主要分布在东、西两侧。

总之,川西须五段页岩气层具有厚度较大、密度较低、致密性较强、裂缝较发育、有机碳含量较高、脆性矿物含量较高、热成熟度适中等特点,在适当的温度、压力及生物化学作用下,利于有机质向烃类转化,在较好的保存条件下易形成大型气藏。

2 须五段页岩地震各向异性

大量的文献及研究证实,页岩存在各向异性^[8-12]。这是因为,构成页岩的矿物颗粒具有大小、形状、成份等差异,在定向排列、层理、片理等岩石本体和结构的组合控制下,页岩地层各个方向的力学性质必然不同,必将导致页岩各个方向的脆性、强度、速度等力学参数表现出相应的差异。基于各向异性介质理论,页岩通常被认为是由层状矿物周期性薄层沉积形成,属于各向异性介质中的横向各向同性(Transverse Isotropy,简称 TI)介质,其平行层面的速度与垂直层面的速度之差可达 30% 以上^[9]。TI 介质包含 VTI (Vertical Transverse Isotropy) 介质和 HTI (Horizontal Transverse Isotropy) 介质,前者的各向同性面垂直于垂直对称轴,后者的各向同性面垂直于水平对称轴。为了分析地层的各向异性特征,需要对地震数据进行分方位处理,尤其在动校正、偏移成像等步骤中,需要基于 TI 介质模型精确分析各向异性参数,并获得分方位叠加地震数据。

川西须五段页岩也不例外。基于宽方位地震数据的速度、振幅、频率等动力学、运动学和几何学等传播特性,就能够分析地层的各向异性。为此,首先对川西须五段地震资料开展了分方位处理,获得了 30°、60°、90°、120°、150°和 180°共 6 个扇区的叠加地震数据;然后,逐个分方位提取地震属性或反演储层参数;最后,综合各个方位的各类地震参数,对页岩地层展开各向

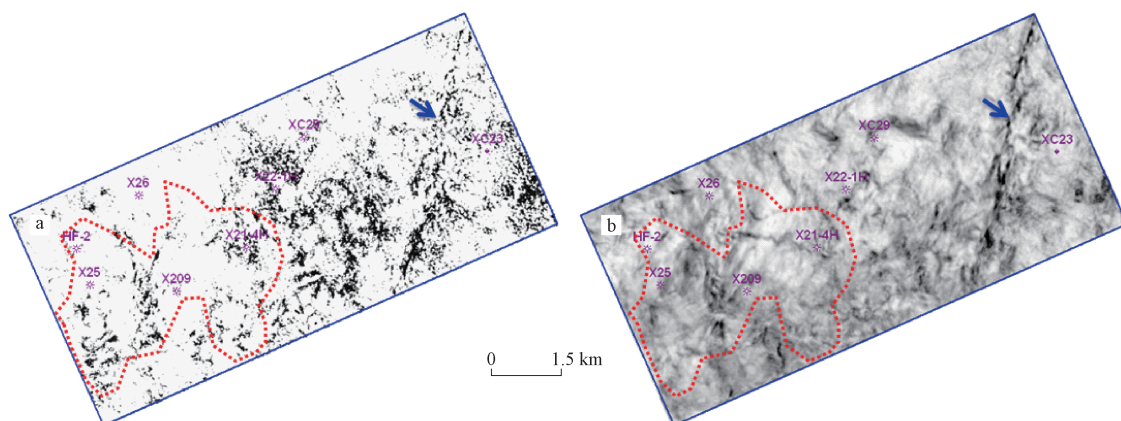


图3 川西坳陷须五段S2层裂缝分布

Fig. 3 Fracture distribution of S2 layer in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 最大曲率属性;b. 地震相干属性

(蓝色箭头指示较大断裂;红色虚线框指示微裂缝异常。)

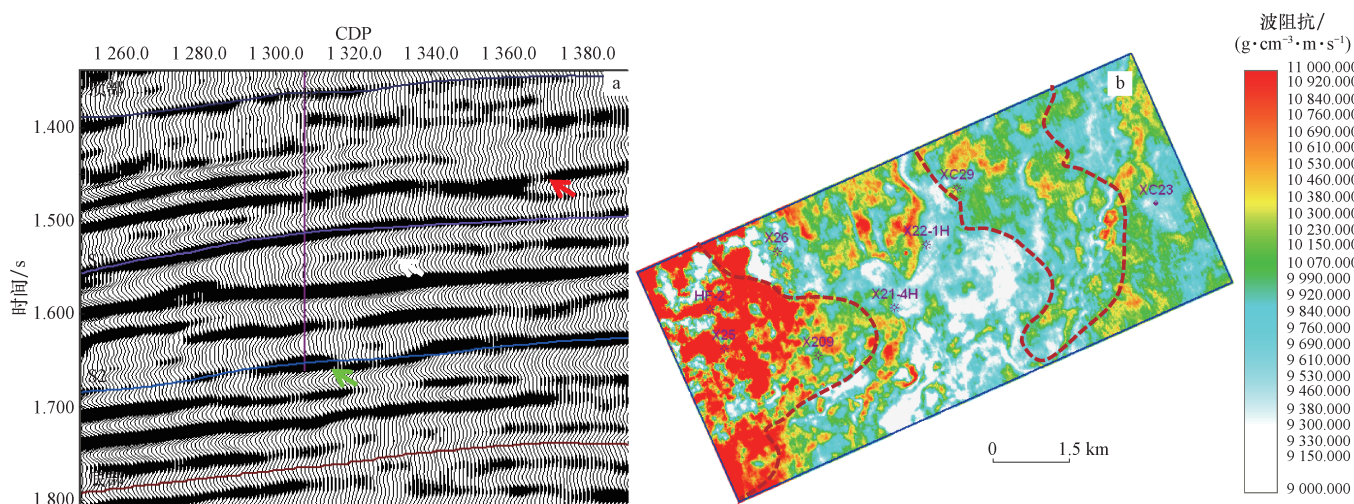


图4 川西坳陷须五段地震响应特征

Fig. 4 Seismic response characteristics of the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 过21-4H井全方位叠加地震剖面;b. S2层纵波阻抗

(红色、白色和绿色箭头分别指示前积反射、丘形反射和透镜反射;红色虚线框指示高纵波阻抗。)

异性分析,实现裂缝、优质储层精细解释和空间展布预测。

2.1 地震反射各向异性

当地层结构、岩性、物性等发生变化时,将产生不同的地震反射。川西须五段主要以滨浅湖沉积相为主,水动力较强,陆源碎屑沉积成岩过程不稳定,非均质性较强,导致地震波场复杂、反射类型较多。如图5所示,随着方位角的变化,21-4H井对应目标储层的地震反射特征明显不同,反射强弱、同相轴连续性、传播时间等展现出了明显的差异性。如果目标储层岩性、沉积或构造特征没有发生变化,则在不同方位可能产生了物性、充填物、结构或裂缝等变化。因而,较强的岩层各向异性直接导致了地震各向异性,反之,基于地震各向异性能够推断岩层内部特征。在地球物理领域,这

是一种通过地震相的响应特征直接分析认识沉积相中存在的地质问题的前沿方法。

将分方位(图5)与全方位地震数据(图4a,绿色箭头所指为相应目标储层)进行比较,后者虽然地震同相轴更清晰、更连续,反映出目标储层构造比较稳定、岩性与物性等没有发生显著变化,但不能获得地层随方位角变化的信息;前者由于受数据叠加次数等因素的影响,资料品质相对较低,但可以观察到明显的地层变化引起了地震各向异性现象。即从30°~90°,目标储层(红色箭头所指)的地震反射由弱到强、由断续到连续;从90°~180°,反射强度变化不明显,但波形却由“胖”变“瘦”,显示地震频率发生了由低到高的变化;从30°~180°,可以观察到地震传播时间在逐渐缩短,反映地震波速度在增大,推断地层可能致密性增加或裂缝欠发育或充填流体减少。因为当储层较致密、裂

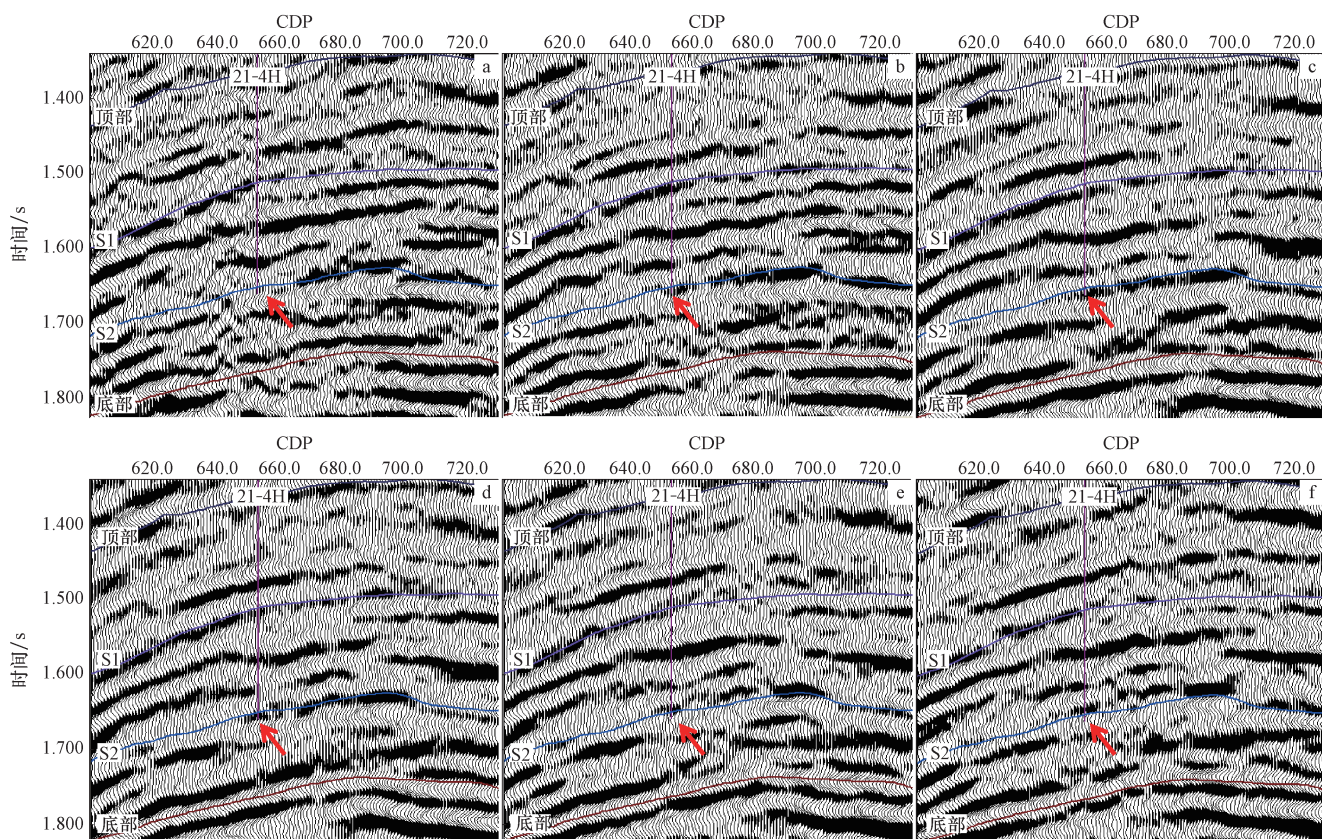


图5 川西坳陷21-4H井须五段分方位地震反射剖面

Fig. 5 Azimuth seismic reflection profiles of the 5th member of the Xujiahe Formation from Well 21-4H in western Sichuan Basin

a. 方位角 30°; b. 方位角 60°; c. 方位角 90°; d. 方位角 120°; e. 方位角 150°; f. 方位角 180°

(红色箭头指示目标储层)

缝欠发育或孔隙流体充填较少的情况下,储层阻抗较高,决定了地震传播速度较快、耗时较少;而当地层之间阻抗差增加时,地震反射将增强。从 30°~180°的地震剖面上,可以较明显地观察到这些振幅、速度、时间等地震响应特征。

2.2 阻抗各向异性

在川西须五段,纵波阻抗是用于判断储层岩性变化的重要参数。前文已阐述,测井与地震响应特征表明,川西须五段页岩阻抗较低,砂岩阻抗较高。由图 6 可见,随着方位角的变化,纵波阻抗的强弱、起伏特征等具有明显的各向异性。在 21-4H 井 S2 层,上覆页岩层较薄,下伏页岩层较厚,中间夹了一套薄砂岩,属于“互层型”岩性组合。该砂层在 30°~120°内阻抗变化不明显,反映地层较稳定,横向展布的连续性较好,而在 150°~180°阻抗由高变低且相比其它方位角变化较大,推测砂层逐渐缺失而被页岩层替代。

图 7 显示,在川西须五段 S2 层河湖沉积体系中发育河道、冲积扇和决口扇等微相,岩性组合以泥页岩和砂岩为主,砂岩主要分布在河道或冲积扇中。从方位角 30°~180°,纵波阻抗能较好地描述页岩和砂

岩沿层展布的边界。但是,在方位 150°(图 7e)中刻画的微型河道(蓝色虚线)的几何形态、岩性组合、轮廓边界、流向等特征最清晰;其他方位阻抗(图 7a—d,f)和全方位阻抗(图 4b)对该河道的刻画均相对较差。21-4H 井钻遇了该套薄河道砂体,上覆和下伏较厚有机质页岩为其提供了丰富的烃源,并形成了“源内气藏”格局,促使该井获得了较好的工业产能(表 1)。

2.3 曲率体各向异性

近年来,地震曲率体属性已经被广泛地用于刻画地质体构造形态、地层界面弯曲程度、应力场分布特征等方面^[13]。研究已证实,地层褶皱或弯曲变形时的应力过程,可以由曲率与裂缝或断层之间的关系直接反映^[14],曲率在描述断层和预测裂缝方面具有分辨率高、识别微裂缝能力强等优势^[13]。因此,基于叠后地震数据计算曲率体属性并用于裂缝检测,已经成为众多裂缝预测手段中的一种先进的通用方法。针对川西须五段存在的低角度缝、网状缝等预测难点,本文基于叠后地震数据最大曲率计算方法^[13],提取了不同方位的最大曲率体属性,获得了裂缝密度、走向等空间发育信息。如图 8 所示,在 S2 层各方位曲率属性上,黑色为曲率高值异常,

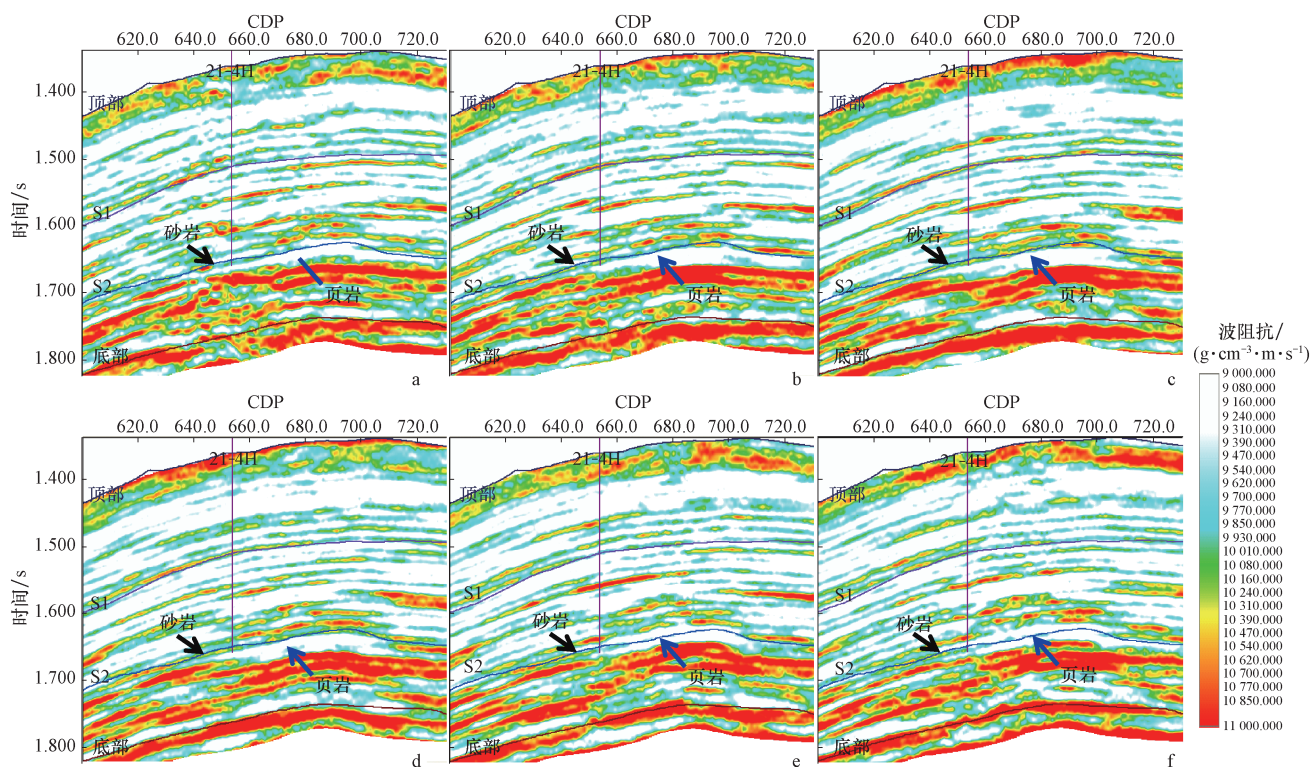


图6 川西坳陷21-4H井须五段分方位纵波阻抗剖面

Fig. 6 Impedance profiles of azimuthal compressional waves from well 21-4H in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 方位角 30°; b. 方位角 60°; c. 方位角 90°; d. 方位角 120°; e. 方位角 150°; f. 方位角 180°

代表裂缝的发育情况,即黑色越密集裂缝密度越高,黑色的延伸方向为裂缝走向。由图可观察到:较大型断层具有相似的曲率异常特征(蓝色箭头所指),而小尺度断层和微裂缝的分布差异较大(红色虚线框内);在30°方位,西部发育高密度裂缝,其他方位则相对较低;在30°~180°,东部裂缝发育均较强;微裂缝走向以近南北向为主,相对略大尺度的裂缝近东西发育,该特征在30°方位裂缝预测图上体现得最明显。

2.4 相干体各向异性

相干体属性具有突出地震信号不相关性的特点,常常用于描述地层的不连续性,是断层和裂缝自动化解释中最常用的地震属性。图9显示了川西须五段S2层地震相干属性随方位角的变化情况:断层或较大型裂缝具有相似的低值相干异常(如蓝色箭头所指);但是,小尺度裂缝或小规模裂缝带的分布差异则较大,该特征在方位角30°裂缝预测图上最明显(红色虚线框内)。可见,川西须五段各向异性较强,存在各方位裂缝分布不均匀的特征。

3 综合预测

四川盆地须五沉积时期,受湖岸地形、洪水面与枯

水面的水位差、高能沉积环境等因素控制,湖盆边缘或近岸的粗碎屑物质供给了主要沉积物源,在川西坳陷形成了大规模的滨浅湖近岸沉积相。在强烈的岸浪与湖盆回流的冲淘、筛选改造作用和枯水期氧化作用下,沉积物的组份、结构和形态变化复杂,直接导致地层出现较强的非均质性和各向异性。这些地层特征,在前文所述的地震反射、阻抗、曲率和相干等属性上均有直观体现。

在地层非均质性和各向异性的影响下,川西须五段裂缝发育较强,包括高角度缝、低角度缝、小尺度缝、大尺度缝、开启缝和充填缝等多种类型。地震曲率和相干属性虽然不能精确地提供裂缝开启性、充填性等信息,但在裂缝走向、发育密度、网络连接特征等方面却能实现精细解释。对比图8和图9可以发现,曲率和相干属性在描述断层、大尺度裂缝方面具有相似能力;但在小尺度和微裂缝刻画方面,曲率分辨能力更强。综合两种属性体现的裂缝特征,可以进一步提高裂缝预测精度。图10a即为S2层分方位曲率和相干综合预测裂缝分布情况,其清晰地展示了断层、大尺度裂缝和微裂缝的沿层发育特征。前期地层应力研究认为,川西须五段S2地层最大主应力方向为南北向,其对断裂带的分布具有很强的控制作用;水平井微地震压裂监测结果也显示,区内裂缝走向以南北向为主

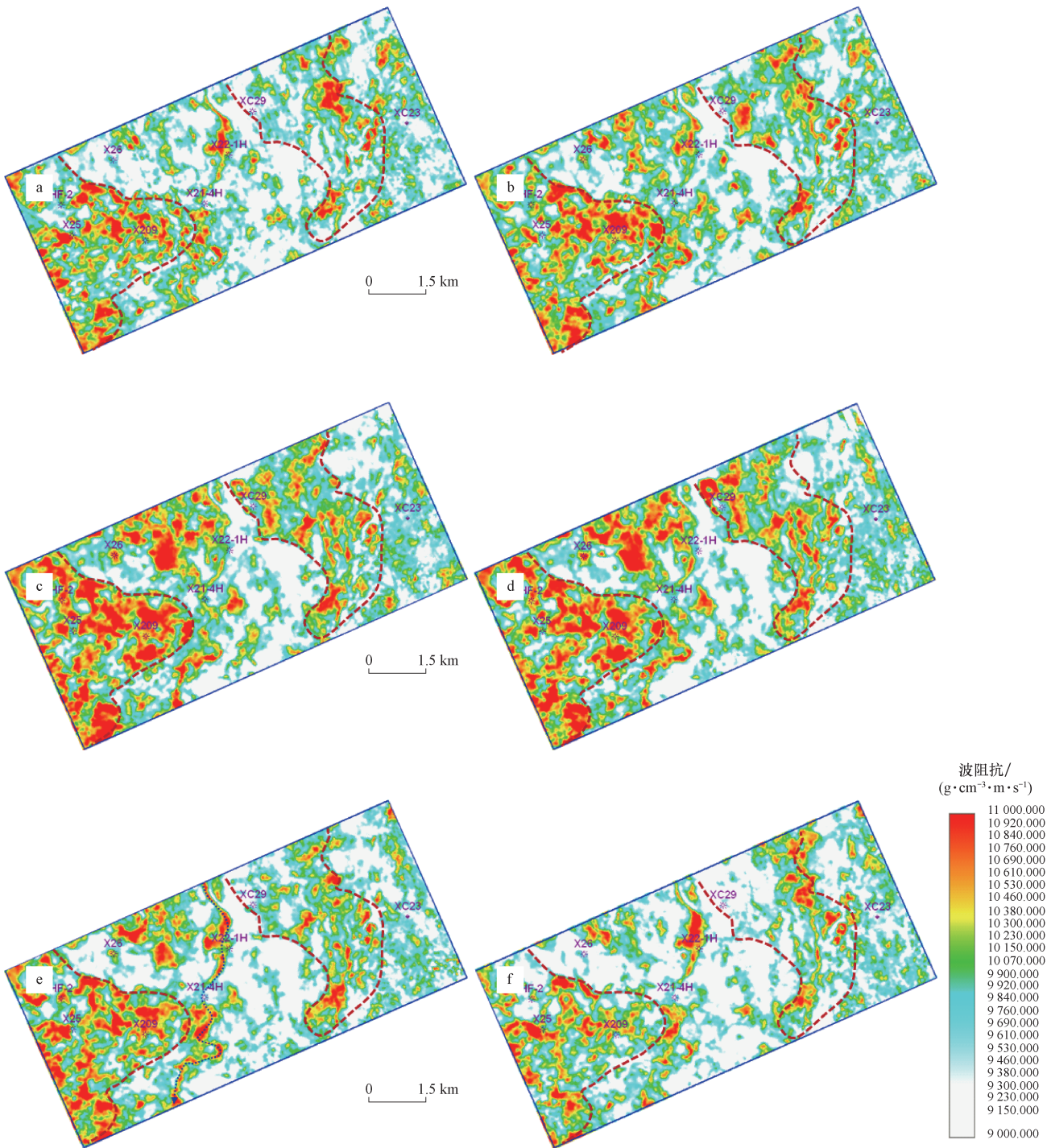


图7 川西坳陷须五段 S2 层方位纵波阻抗

Fig. 7 Impedance of azimuth compressional waves from S2 in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 方位角 30°; b. 方位角 60°; c. 方位角 90°; d. 方位角 120°; e. 方位角 150°; f. 方位角 180°
(红色虚线框指示砂岩分布区; 蓝色虚线指示微型河道。)

表1 川西坳陷须五段 S2 层各井产能概况

Table 1 Production performance of wells penetrating S2 in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

井 号	天然气获产情况	井 号	天然气获产情况
HF-2	工业产能	X21-4H	工业产能
X25	工业产能	X22-1H	低产
X209	工业产能	XC29	工业产能
X26	工业产能	XC23	低产

(图 10c)。这些研究认识与图 10a 显示的结果高度一致。对比图 10 中的两类预测结果,显然,分方位比全方位裂缝综合预测效果更好,描述的裂缝细节更清晰。

综合图 7e 和图 10a,能够分析储层中的裂缝发育特征,进而预测川西须五段 S2 层中的“甜点”区域(图 10c)。前文已经阐述,川西须五段页岩层具有厚度较大、有机碳丰度高、热成熟度适中、生烃潜力大、

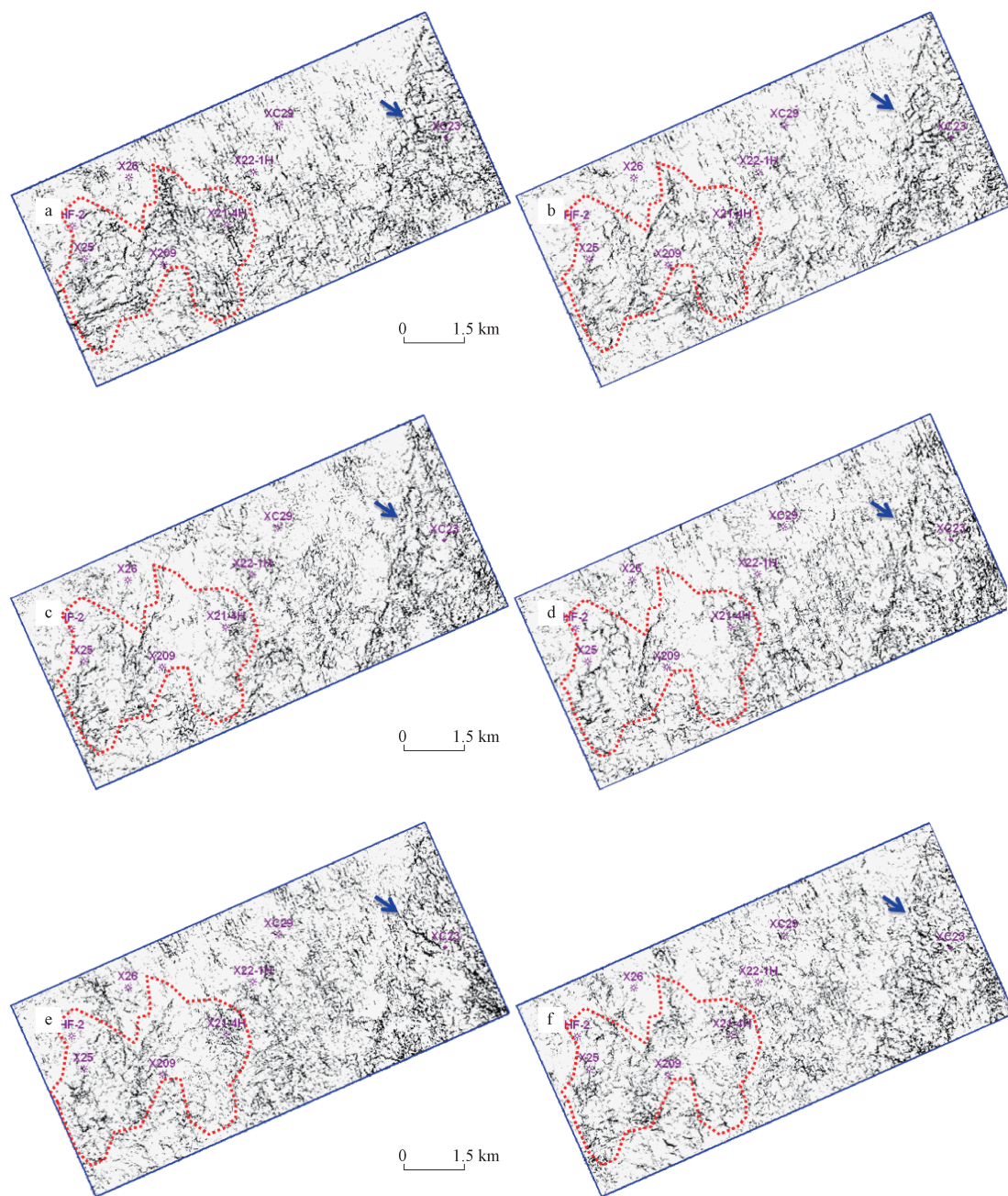


图8 川西坳陷须五段 S2 层分方位地震最大曲率体属性

Fig.8 Maximum curvature attribution of azimuth seismic data from S2 in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 方位角 30°; b. 方位角 60°; c. 方位角 90°; d. 方位角 120°; e. 方位角 150°; f. 方位角 180°

(黑色指示曲率高值异常, 黑色越密集裂缝密度越高, 黑色的延伸方向为裂缝走向。蓝色箭头指示较大断裂。

红色虚线框指示小尺度断层和微裂缝。)

粘土含量低、脆性矿物含量高等有利于页岩气富集的特点;在该前提下,裂缝网络较发育的区域,可以视为页岩“甜点”储层。在图 10c 所示的岩性与裂缝综合预测结果中,川西须五段 S2 层中部页岩分布面积较大且近南北向的裂缝发育密度较高、裂缝网络连接较好;西部河道和冲积扇沉积微相中发育了大面积的砂岩,其中裂缝较发育的区域可视为孔隙度相对较高的砂岩“甜点”储层。对比图 10 中的两类综合预测结果,显

然,分方位(c)比全方位(d)效果更好,更清晰地描述了河道沉积相边界、砂页岩空间展布和裂缝走向、发育密度等。这是由于在解释过程中,分方位数据量更大(类似叠前比叠后数据量更大),提供的信息更加丰富,更适用于刻画地层的非均质和方位各向异性特征,因而在岩性判别、沉积微相边界描述和裂缝预测等方面能更有效地突出地质细节,有利于地震精细解释和地质认识程度的进一步提高。

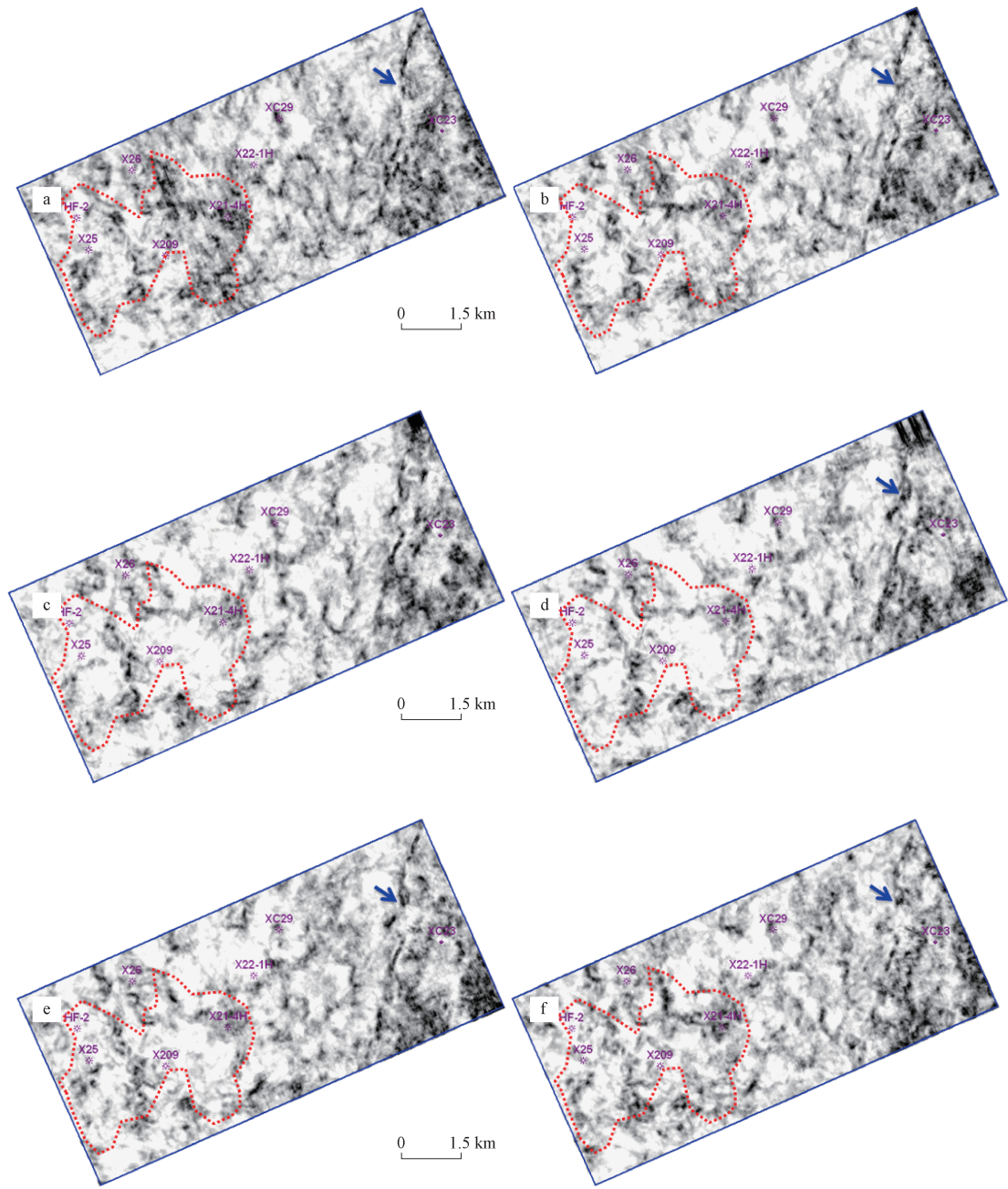


图 9 川西坳陷须五段 S2 层分方位地震相干属性

Fig. 9 Coherence attribution of azimuth seismic data from S2 in the 5th member of the Xujiache Formation in western Sichuan Basin

a. 方位角 30°; b. 方位角 60°; c. 方位角 90°; d. 方位角 120°; e. 方位角 150°; f. 方位角 180°

(黑色指示地震相干属性,颜色越黑代表相干值越小、裂缝或断层越发育,黑色越密集代表裂缝密度越高。蓝色箭头指示断层或较大规模断裂。红色虚线框指示小尺度裂缝或小规模裂缝带。)

4 结论与认识

川西坳陷须五段天然气资源量巨大,地质认识程度低,尤其在各向异性方面研究极少。然而,页岩受自身的矿物成分、碎屑颗粒的定向排列结构、周期性的薄层沉积环境等因素的控制,岩层通常具有较强的各向异性。在地震解释过程中,基于地震数据提取的各类方位属性参数,是岩层各向异性信息的直接响应;如果仅利用全方位地震数据进行各向同性

解释,必然忽视岩层的各向异性本质,降低地质认识精度。本文基于分方位与全方位地震数据,对比分析了这两类数据在刻画沉积相、岩性、裂缝等方面的差异,获得如下认识:

1) 在川西须五段河湖沉积体系的河道、冲积扇等微相中,受高能环境和沉积控制作用,地层以泥页岩和砂岩为主体岩性组合,岩性横向变化大,岩层空间分布不均匀,岩石非均质性和各向异性较强。

2) 分方位地震数据的反射特征和阻抗、曲率体和相干体等属性,直观地反映了川西须五段沉积相、岩性

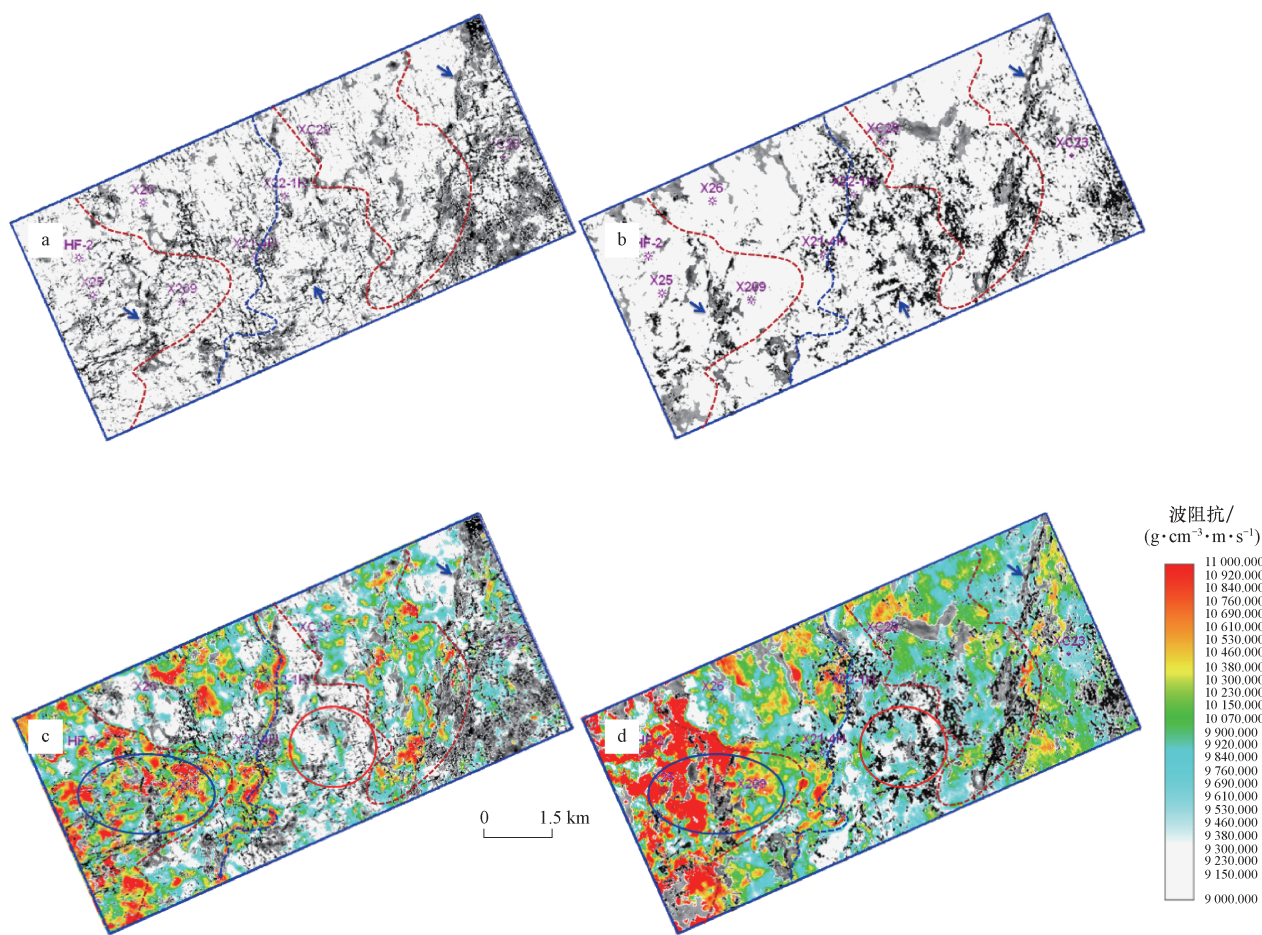


图10 川西坳陷须五段S2层分方位与全方位综合预测效果对比

Fig. 10 Comparison of prediction based on azimuth and wide-azimuth seismic data of S2 in the 5th member of the Xujiahe Formation in western Sichuan Basin

a. 分方位裂缝综合预测; b. 全方位裂缝综合预测; c. 分方位“甜点”储层综合预测; d. 全方位“甜点”储层综合预测

(红色虚线框指示砂岩分布区; 蓝色虚线指示微型河道; 蓝色箭头指示较大断裂; 蓝色实线包围区指示砂岩“甜点”储层; 红色实线包围区指示页岩“甜点”储层。)

和裂缝发育等细节,有利于页岩气藏中沉积相与岩性边界、“甜点”储层的精确描述。

参考文献

- [1] 胡广成, 鲍志东. 四川盆地上三叠统须四段和须五段沉积相[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 508-511.
Hu Guangcheng, Bao Zhidong. Sedimentary facies of fourth and fifth members of upper Triassic Xujiahe formation, Sichuan basin[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2008, 27(4): 508-511.
- [2] 孙玮, 刘树根, 韩克猷, 等. 四川盆地燕山期古构造发展及对油气的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 70-75.
Sun Wei, Liu Shugen, Han Keyou, et al. Effect of the evolution of palaeotectonics on the petroleum genesis in Yanshan period, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2012, 39(1): 70-75.
- [3] 陈冬霞, 谢明贤, 张晓鹏, 等. 川西坳陷须五段陆相页岩气聚集条件分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(26): 5-10.
Chen Dongxia, Xie Mingxian, Zhang Xiaopeng, et al. Shale gas accumulation conditions and its exploration and development prospects of the 5th Member of the Xujiahe Formation of Upper Triassic in Western Sichuan Depression[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2013, 10(26): 5-10.
- [4] 唐立章, 张贵生, 张晓鹏, 等. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 5-7.
Tang Lizhang, Zhang Guisheng, Zhang Xiaopeng, et al. Main control factors of forming the tight sands stone gas reservoirs in Xujiahe formation in west Sichuan depression[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 5-7.
- [5] 沈忠民, 刘涛, 吕正祥. 川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 577-582.
Shen Zhongmin, Liu Tao, Lv Zhengxiang. A comparison study on the gas source of Jurassic natural gas in the western Sichuan depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 577-582.
- [6] 叶军. 川西坳陷侏罗系烃源岩评价[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(3): 11-14.
Ye Jun. Evaluation on hydrocarbon source rocks in Jurassic system of Chuanxi depression[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2001, 8(3): 11-14.
- [7] 黄亮, 孟海龙, 周鑫宇, 等. 四川盆地须五段烃源岩地化特征及有利烃源岩分布预测[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013,

- 15(5):1-4.
- Huang Liang, Meng Hailong, Zhou Xinyu, et al. Research on source characteristics and favorable source rock distribution areas prediction of the fifth Member of Xujiahe Formation of Sichuan Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2013, 15(5):1-4.
- [8] 王倩, 王鹏, 项德贵, 等. 页岩力学参数各向异性研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(12):62-65
- Wang Qian, Wang Peng, Xiang Degui, et al. Anisotropic property of mechanical parameters of shales[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12):62-65.
- [9] Jennifer M, Leslie, Don C, et al. A refraction seismic field study to determine the anisotropic parameters of shales[J]. Geophysics, 1999, 64(4):1247-1252.
- [10] 高德利. 地层各向异性的评估方法[J]. 石油学报, 1993, 14(2):96-101.
- Gao Deli. A method for the evaluation of formation anisotropy[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2):96-101.
- [11] 赵平芳, 姚增. 层状岩石动静态力学参数相关性的各向异性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1993, 29(4):225-229.
- Zhao Pinglao, Yao Zeng. The anisotropy of the dynamic parameters with the static parameters of bedded rock[J]. Journal of Lanzhou University, 1993, 29(4):225-229.
- [12] 刘斌, 席道瑛, 葛宁洁, 等. 不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6):880-890.
- Liu Bin, Xi Daoying, Ge Ningjie, et al. Anisotropy of Poisson's ratio in rock samples under confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(6):880-890.
- [13] 孔选林, 李军, 徐天吉, 等. 三维曲率体地震属性提取技术研究及应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5):71-75.
- Kong Xuanlin, Li Jun, Xu Tianji, et al. Research and application of 3D volumetric curvature seismic attribute extraction technology[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(5):71-75.
- [14] 张旭峰, 张进学, 牟克勋, 等. 体属性分析在精细构造研究中的应用[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5):599-601.
- Zhang Xufeng, Zhang Jinxue, Mou Kexun, et al. Application of volumetric attributes analysis to fine structural interpretation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(5):599-601.

(编辑 张亚雄)

(上接第318页)

- [8] 蔡庆龙. 油气勘探风险评价方法与评价模型[J]. 石油化工技术经济, 2003, 19(2):58-62.
- Cai Qinlong. Evaluation method and model of risks in oil-gas exploration[J]. Techno-economics in petrochemicals, 2003, 19(2):58-62.
- [9] Rose P R. Risk analysis and management of petroleum exploration ventures(AAPG Method in Exploration Series, No. 12)[M]. Tulsa: PennWell Corporation, 2001:125-127.
- [10] 宋建国, 张光亚. 勘探目标评价方法[J]. 世界石油工业, 1998, 5(8):8-12.
- Song Jianguo, Zhang Guangya. Exploration target evaluation method[J]. World Petroleum Industry, 1998, 5(8):8-12.
- [11] 方小东, 郭元岭, 胡兴中. 油气勘探状态评价新方法[J]. 河南石油, 2005, 106(6):6-8.
- Fang Xiaodong, Guo Yuanling, Hu Xingzhong. New evaluation method of petroleum exploration[J]. Henna Petroleum, 2005, 106(6):6-8.
- [12] 武娜, 郭秋麟, 梁坤, 等. 用新思路评价冀中坳陷深县凹陷油气勘探风险[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3):326-333.
- Wu Na, Guo Qiulin, Liang Kun, et al. Risk assessment for oil and gas exploration with new approaches in the Shexian Sag of the Jizhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3):326-333.
- [13] 周总瑛, 唐跃刚. 油气资源评价中风险分析方法探讨[J]. 长江大学学报(社会科学版). 2004, 27(1):108-111.
- Zhou Yongying, Tang Yuegang. A discussion on method of risk analysis for oil and gas resource evaluation[J]. Journal of Yangtze University(Social Science), 2004, 27(1):108-111.
- [14] 李洁梅, 谭学群, 许华明, 等. 概率法储量计算在 CLFS 项目中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6):943-950.
- Li Jiemei, Tan Xuequn, Xu Huaming. Application of probabilistic method in reserve calculation for the CLFS oilfield project[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6):943-950.
- [15] 李辛子, 刘彬, 武晓玲. 通南巴地区膏盐层分布及其流变学特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4):532-539.
- Li Xinzi, Liu Bin, Wu Xiaoling, et al. Distribution and rheological characteristics of evaporates in Tongnanba area[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4):533-539.

(编辑 张玉银)