

深水盐下湖相碳酸盐岩缝洞地震预测

——以巴西桑托斯盆地F油田为例

黄文松¹,徐芳¹,刘成彬²,黄继新¹,赵俊峰²,郭松伟¹,李云波¹

[1. 中国石油勘探开发研究院,北京100083; 2. 中油国际(巴西)公司,里约热内卢巴西22250-040]

摘要:桑托斯盆地F油田位于巴西深水区域的盐岩之下,具有埋藏深、岩性多样、非均质性强的特点。与常规的以孔隙型为主的储层和中国西部“串珠状”的大型溶洞储层不同,研究区碳酸盐岩为深水盐下湖相碳酸盐岩,其溶蚀孔洞孔径小、裂缝类型多,导致地震响应特征极其不明显,常规缝洞预测方法不适用。另外,受上覆巨厚盐岩层的影响,缝洞发育储层段的地震资料分辨率低,增加了利用叠后地震方法预测其分布规律的难度。因此,针对研究区缝洞发育特点,采取井震相结合的思路,以消除泥岩及火成岩岩性干扰为前提,首先进行地震资料优化处理,然后充分利用岩心、FMI测井等资料以及生产漏失等信息,综合分析地震异常可能表达的地质信息,探索了一套适用于深水盐下多种岩性发育背景的小尺度湖相碳酸盐岩缝洞储层地震预测方法。该方法明确了裂缝与孔洞的敏感地震属性,通过联合构造应力场进行裂缝预测,结合波阻抗、孔隙度及CGR等地震反演结果,开展溶蚀孔洞预测,取得了良好的预测效果,对湖相碳酸盐岩缝洞储层预测研究有借鉴意义。

关键词:敏感地震属性;地震反演;碳酸盐岩缝洞预测;深水盐下储层;湖相碳酸盐岩;桑托斯盆地;巴西

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Seismic prediction of fractures and vugs in deep-water sub-salt lacustrine carbonates: Taking F oilfield in Santos Basin, Brazil as an example

Huang Wensong¹, Xu Fang¹, Liu Chengbin², Huang Jixin¹, Zhao Junfeng², Guo Songwei¹, Li Yunbo¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Brazil Petroleum and Gas Company, CNODC, Rio de Janeiro 22250-040, Brazil)

Abstract: The F oilfield, a deep-water sub-salt oilfield in the Santos Basin of Brazil, is characterized by deep burial, diverse lithology and strong heterogeneity. Unlike commonly-seen porous reservoirs and some large karst cave reservoir clusters in Western China, the reservoirs in the study area are deep-water lacustrine carbonate rocks with small vug size and various fracture types, resulting in extremely unclear seismic responses and wrong interpretations with conventional prediction methods for fractured-vuggy reservoirs. In addition, the massive salt layers overlaying the reservoirs also reduce the resolution of seismic data of well fractured and vuggy parts and pose challenges to the understanding of their distribution pattern through post stack seismic method. To deal with the problem, this study develops a workflow suitable for the seismic prediction of small fractured-vuggy carbonate reservoirs of diversified lithology against a deep-water sub-salt setting based on the development characteristics of fractures and vugs in the study area and a combination of well and seismic data analyses to eliminate the lithologic interference of mudstone and igneous rocks. It features in the optimization of seismic data and a quick responsiveness to geological information conveyed through seismic anomalies by making full use of core, FMI well-logging and production leakage information. Application to the prediction of dissolution pores and vugs has been proven positive as the method is capable of defining the sensitive seismic attributes of fractures and vugs to predict fractures by combining structural stress field and to predict vugs by combining seismic inversion results such as wave impedance, porosity and CGR. The study is of guiding significance to the prediction of lacustrine carbonate reservoirs with fractures and vugs.

收稿日期:2021-11-09;修订日期:2022-01-20。

第一作者简介:黄文松(1973—),男,高级工程师,油气田开发地质。E-mail: hwshws6@petrochina.com.cn。

Key words: sensitive seismic attribute, seismic inversion, prediction of carbonate fractures and vugs, deep-water sub-salt reservoir, lacustrine carbonates, Santos Basin, Brazil

引用格式: 黄文松, 徐芳, 刘成彬, 等. 深水盐下湖相碳酸盐岩缝洞地震预测——以巴西桑托斯盆地F油田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 445-455, 488. DOI: 10. 11743/ogg20220216.

Huang Wensong, Xu Fang, Liu Chengbin, et al. Seismic prediction of fractures and vugs in deep-water sub-salt lacustrine carbonates: Taking F oil-field in Santos Basin, Brazil as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 445-455, 488. DOI: 10. 11743/ogg20220216.

桑托斯(Santos)盆地是巴西最大的海岸盆地之一, 现今水深约1 800~2 200 m。F油田位于桑托斯盆地东北部(图1a), 主要目的层为盐下(盐岩沉积之下)的下白垩统巴雷姆阶-阿普特阶 Guaratiba 群碳酸盐岩沉积(图1b), 主力含油层自下而上分为 Itapema(简称 ITP)组(可分为上、下两个亚组, 即上 ITP 与下 ITP)和 Barra velha(简称 BVE)组(也可分为上、下两个亚组, 即上 BVE 与下 BVE)(图1c), 埋藏深度大于5 000 m,

为典型的深水盐下湖相碳酸盐岩油藏^[1-2]。

全球范围内的盐下碳酸盐岩油藏资源丰富, 储层类型多样: 如全球最大的油田——沙特阿拉伯的盖瓦尔油田^[3], 其中主力储层 Khuff 层为晚二叠世沉积, 主要孔隙类型为印模孔隙和粒间孔隙, 孔隙度变化范围为5%~30%^[4]; 又如位于滨里海盆地让纳若尔油田, 主力储层为盐下的石炭系灰岩, 储层类型以孔隙型和裂缝-孔隙型为主^[5]; 国内盐下碳酸盐岩油田以塔里木盆地塔

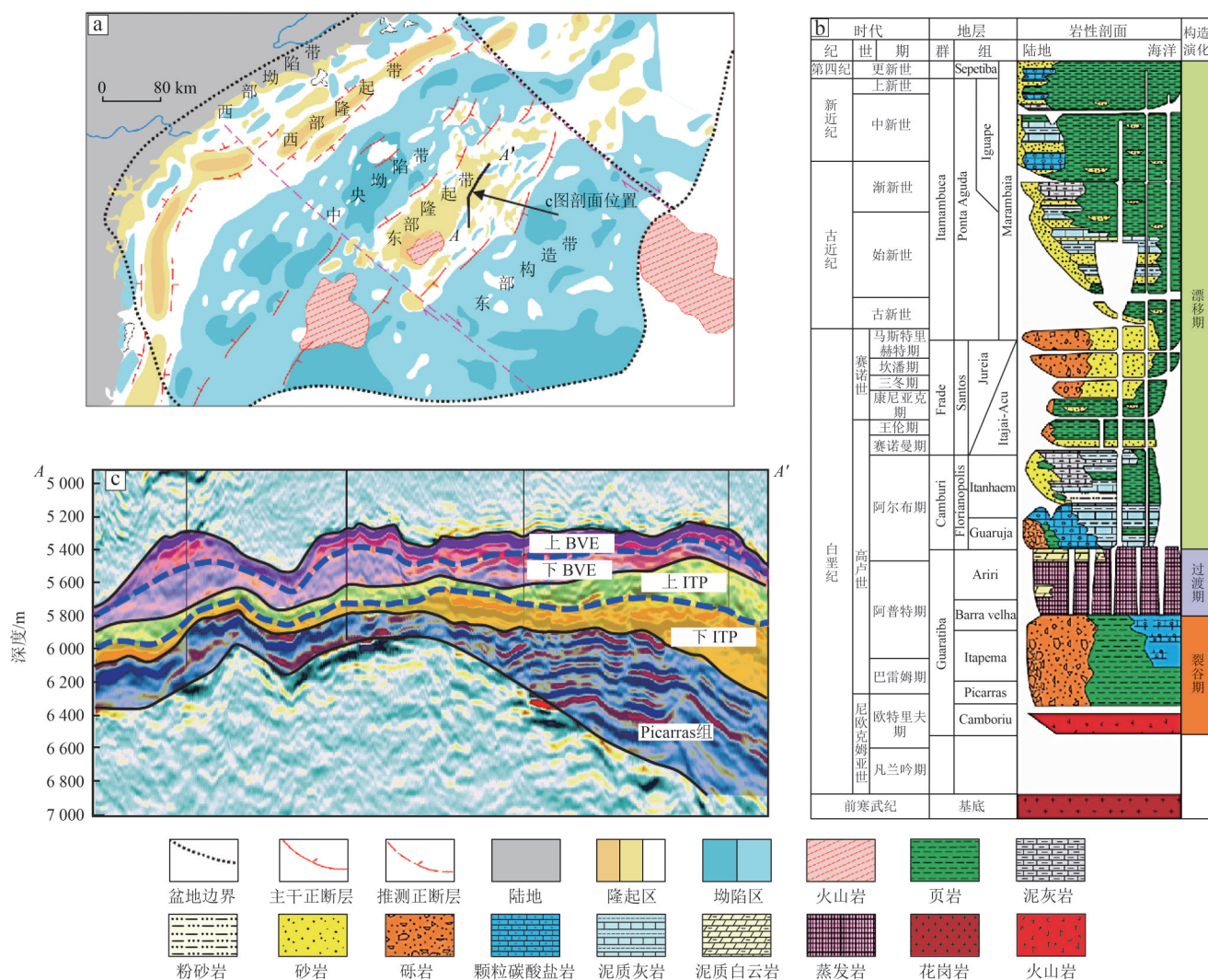


图1 桑托斯盆地F油田位置及其地层单元划分

Fig. 1 Location and stratigraphic units of the F oilfield, Santos Basin

a. 区域构造区带划分; b. 地层综合柱状图; c. 典型地域剖面与地层划分

河油田为典型,目的层奥陶系埋深大于5 000 m,储层孔隙度较低,基质不具备储集性,岩溶特征明显,储集类型以溶洞和裂缝为主,具有“串珠状”地震强反射特征^[6-7]。

受区域古地貌的控制,桑托斯盆地是全球关注的盐下湖相碳酸盐岩热点研究区域^[1-8]。桑托斯盆地F油田沉积环境复杂,多种岩相复杂发育,整体上以百米级厚层湖相碳酸盐岩为主。其中,BVE组主要以湖相叠层石灰岩和颗粒灰岩为主^[2],ITP组主要以介壳灰岩为主^[8],泥岩和泥晶灰岩呈薄层发育;且由于火山作用,岩浆沿大型断裂等通道运移至碳酸盐岩地层之中,形成辉绿岩和玄武岩等火山岩(图1b)。

除岩性多样外,F油田的储层储集空间同样呈多种类型复合发育的特征。储集空间整体以孔隙为主,孔隙度集中分布在8%~20%,物性较好。且受溶蚀、压溶、压实、白云岩化等多种复杂成岩作用和多期次构造运动影响,自下而上形成了ITP组底界、ITP组顶界、上BVE亚组底界和顶界4个不整合面(图1c),小型的溶蚀孔洞和裂缝较发育,孔径一般在毫米级左右,体现了较强的储层非均质性特征。

尽管研究区储层以孔隙为主,发育的溶蚀孔洞及裂缝规模小,但其对储层的改善以及油藏开发都起到一定的影响作用,因此对该类小型溶蚀孔洞及裂缝的空间分布预测尤为重要。然而,受巨厚盐丘以及复杂成岩作用等因素的共同制约,盐下碳酸盐岩缝洞储层预测一直以来就是难点,针对该类型储层的研究较少,且经井震标定,研究区缝洞的地震响应特征又不明显,

这为本区缝洞储层预测带来极大的挑战。因此,基于本区盐下碳酸盐岩储层发育特点,如何充分利用地质信息,加强井震结合,深度挖掘地震特征,提高储层中小型缝洞的预测精度成为关键。为规避厚层盐岩对其下岩层的屏蔽效应,研究发现谱蓝化拓频处理技术可以提高地震勘探数据的分辨率。基于重新处理的地震资料,本文在常规裂缝与孔洞研究基础上,融合地震反演、地震属性及构造应力场信息,提出了针对此种盐下湖相碳酸盐岩的缝洞储层预测方法,并在桑托斯盆地F油田应用,结果表明该方法适于此类碳酸盐岩缝洞型储层的表征与预测。

1 地震资料特点

研究区发育巨厚盐丘(图2a),厚度普遍大于2 000 m。盐下目的层地震成像受盐丘的屏蔽影响,地震反射信号弱,分辨率低,地震资料优势频带仅分布在10~40 Hz,主频15 Hz(图2b),碳酸盐岩内部成像不清晰。另外,受盐岩速度影响,时间域地震剖面反映的盐下地层构造形态往往存在畸变。为减弱盐岩对下伏碳酸盐岩储层研究的影响,本次研究主要采用深度域地震资料,但因地震资料信噪比低,分析认为该地震资料不能较好的满足小型缝洞的精细预测需求。

该区多种岩性复杂发育,而溶蚀孔洞的发育及分布主要与碳酸盐岩储层相关联。根据灰岩(叠层石灰岩/颗粒灰岩、介壳灰岩)、泥岩和火成岩(辉绿岩和玄

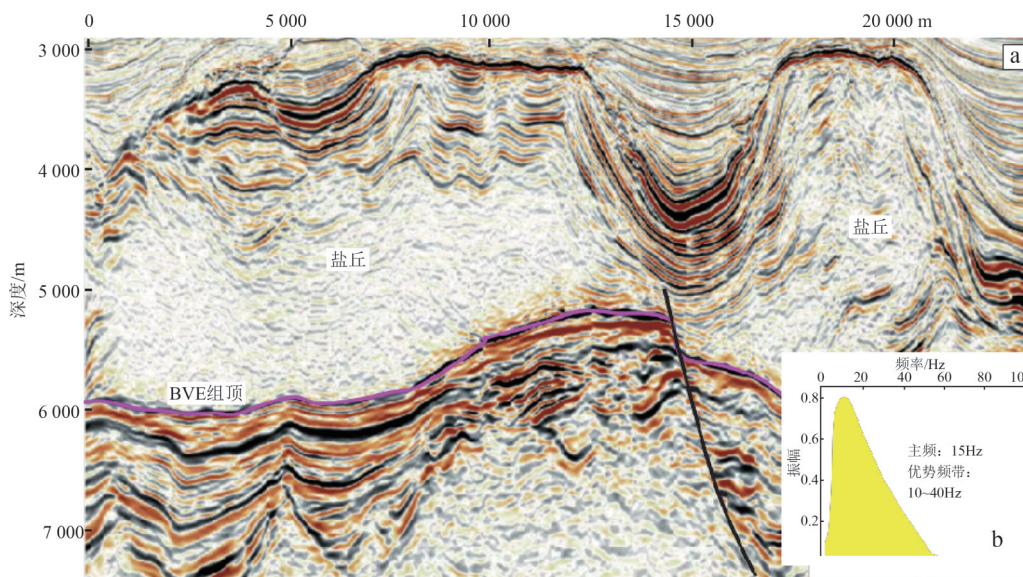


图2 桑托斯盆地F油田反映盐丘特征的地震资料频谱分析

Fig. 2 Spectrum analysis of seismic data indicating salt domes, F oilfield, Santos Basin

a. 过盐丘的典型地震剖面; b. 地震频谱分析

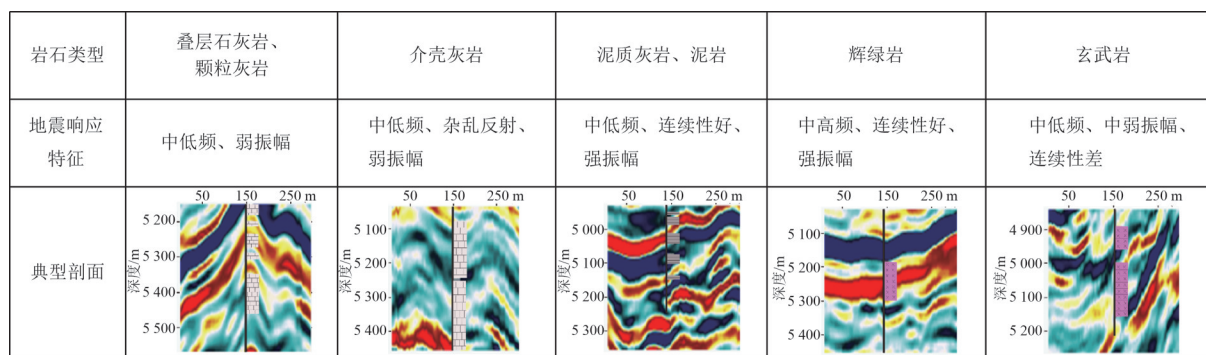


图3 桑托斯盆地F油田不同岩性对应的地震响应特征

Fig. 3 Analysis of seismic response characteristics corresponding to different lithologies, F oilfield, Santos Basin

玄武岩)对应的地震响应特征分析结果(图3),除辉绿岩具有中高频及强振幅的特征外,玄武岩和泥岩的地震反射特征均与灰岩在一定程度上相混淆,即很难基于地震信息落实灰岩储层的分布范围,进而明确溶蚀孔洞的发育规律。

2 缝洞地震预测方法

受限于缝洞系统分辨率小于地震资料分辨率,利用目前的地震技术方法检测和识别单个较小的缝和溶蚀孔洞是难以达到预期效果的,导致用地震资料预测此类储层与计算储量误差较大^[9]。但当空间某一区域的裂缝、溶蚀孔洞比较集中时,相邻地震道间会表现为较明显的差异性,由多个溶蚀孔洞或裂缝组成的发育带是可以识别与检测的^[10]。

有关缝洞储层识别与检测的地震预测方法,前人已开展了许多有益研究。例如,可以通过模型正演,综合利用地震参数提取、振幅变化率计算、相干体分析、波阻抗反演及波形分析等方法开展缝洞型储层预测^[6];也有人提出利用相干体分析、振幅属性提取、多尺度裂缝检测、频率差异分析和波阻抗反演等技术联合来预测碳酸盐岩缝洞储层^[11]。除利用传统的倾角和方位角等几何层属性进行小断层与裂缝研究外,还可以利用地震相干性、谱分解及地震横波方位各向异性等信息来检测小断层和裂缝分布^[12-13]。也可以基于地震和井间资料,开展多尺度缝洞综合预测^[14],即利用AVAZ方位各向异性特征,优选频率衰减梯度属性并结合生产数据预测微尺度和中尺度裂缝的分布。利用叠后地震属性、方差、曲率和蚁群算法对宏观裂缝分布进行预测,并利用地震成像数据的瞬时峰值频率来预测洞穴的分布。同时地震挠曲度属性也可用于描绘细微断层和裂缝^[15]。还可以基于RTM3D数据体,通过提取相似的不连续属性,来预测断层和裂缝的分

布^[16]。另外,依据断裂地质特征及地震识别模式,可以优选趋势面、提取蚂蚁体和最大似然体等敏感属性,对小尺度缝洞进行描述和评价^[17]。通过井震结合的地震多属性融合缝洞体系综合预测,将地震属性的裂缝预测结果与成像测井提取的裂缝孔隙度通过交会图分析确定属性有效范围,再对有效范围内的地震属性值进行融合,形成最终的裂缝预测结果^[18]。

上述地震方法利用叠前及叠后地震资料,从多种地震属性到波阻抗反演以及地震属性与单井裂缝参数交会综合分析,对缝洞型碳酸盐岩储层进行了定性到半定量-定量的预测和描述。但对本区缝洞系统研究而言,主要受3个方面因素的制约:①缝洞系统不是主要的储层储集类型,仅局部发育,因此分布规律非常复杂;②缺乏露头数据,对于研究区碳酸盐岩缝洞发育分布规律研究而言,仅通过岩心、薄片及FMI成像测井资料,属于有限的标定资料且缺少裂缝相关参数的定量描述;③研究区缝洞发育的地质尺度非常小,岩性多样,地震资料识别与预测的精度不满足。

为提高缝洞储层预测精度,针对研究区缝洞发育特点,采取井震相结合,以消除泥岩及火成岩的岩性影响为前提,充分利用岩心、FMI测井等资料以及生产漏失等信息,融合地震波阻抗反演、地震属性提取等多种地震技术手段,综合分析地震信息异常可能表达的地质信息,探索了一套适用于盐下多岩性发育背景下的小尺度湖相碳酸盐岩缝洞预测的方法(图4)。

该方法以深度域地震资料为基础,对地震资料进行拓频处理后,开展地震反演预测岩性并进行储层特征分析,分析岩性体的分布规律;运用地震属性分析方法预测溶孔溶洞预测,分析溶孔溶洞的分布规律;利用岩心、薄片及FMI测井信息,结合构造应力场、裂缝属性及似然体属性,分析裂缝分布与走向规律;最终分析缝洞储层形成与分布的主控因素(图4)。

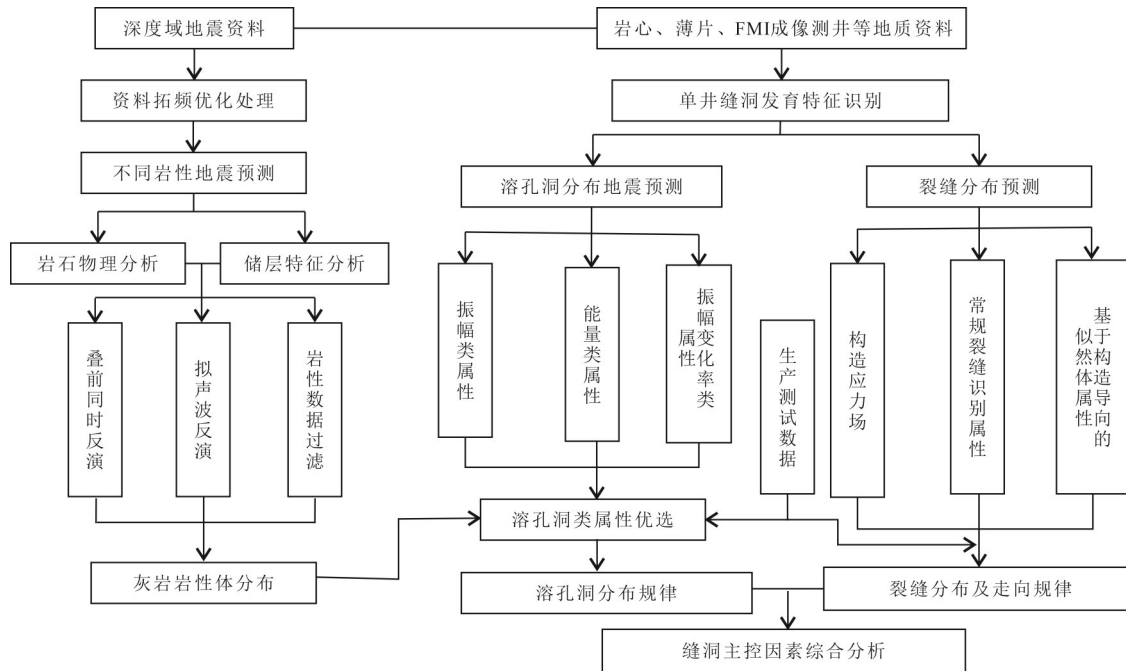


图4 基于多岩性发育条件的缝洞预测综合研究方法与流程

Fig. 4 Workflow for fracture and vug prediction in a multi-lithology setting

2.1 地震资料优化处理

目前F油田已进入开发阶段,小尺度碳酸盐岩缝洞系统的刻画对油田开发尤为重要,需要对已有深度域地震资料进一步优化处理,拓宽地震资料频带宽度、提高预测精度。

常用的地震资料拓频方法有子波反褶积技术^[19]、谱反演拓频技术^[20]以及谱蓝化拓频技术^[21]等。具体来讲,子波反褶积技术是通过压缩地震记录中的地震子波,压制交混回响和层间短周期多次波,从而提高垂向时间分辨率,但其存在着很多局限性和缺陷,如噪音的带入。谱反演技术是在叠后地震数据体基础上,直接反演出时间域的全频带反射系数序列数据,分辨率很高,许多地质现象的细节得以呈现,更适用于对薄层地质体或油藏圈闭的精细识别。而谱蓝化拓频处理技术是先恢复地震勘探数据中严重衰减的高频部分,然后利用更高的频率对应更高振幅的这种蓝谱特征,将恢复后的地震勘探数据与从测井数据中获得的反射系数相匹配,从而提高地震勘探数据的分辨率。通过该技术处理后的地震振幅谱曲线形态与地层反射系数保持一致,在提高分辨率的同时又不会提高噪声的影响,又可以提高地层反射系数的保真度。

考虑到本区目的层位于巨厚盐丘之下,原始地震资料信噪比较低(图5a),为避免高频噪声的增强,发

现谱蓝化拓频处理技术更适合此种条件。因为经谱蓝化拓频技术处理后,地震剖面分辨率和带宽有所提高,地震剖面同相轴更精细,有效频带范围内的高频弱信号能量强度得到增加,同时又能基本保持原始地震勘探数据的信噪比、振幅和时频特性(图5b)。

2.2 裂缝地震预测方法

受构造和成岩双重作用影响,研究区裂缝发育复杂,规模不等。岩心观察可以识别出构造缝、层间缝、溶蚀缝和缝合线等多种成因缝。从裂缝发育规模看,主要分为两种类型(图6):①大型裂缝,延伸长度在米级以上,近直立发育,断面平整(图6a),FMI图像呈高角度暗色正弦曲线(图6b),主要为构造缝;②小型裂缝,延伸长度在米级以下,又可划分为规则缝(图6c)和不规则缝(图6d)两类。小型规则缝成组出现,构造倾向相对统一,具有明确的方向性;不规则小型裂缝方向不明确,断裂面不平整,多与溶蚀作用关联。

结合地震叠前反结果的前提下,本文主要基于叠后地震资料进行裂缝预测。但单靠叠后地震属性仅能定性预测裂缝的强度分布,因此,在多种地震属性优选预测的基础上,联合构造应力场裂缝预测技术进行构造成因缝模拟,不仅能实现大、中小尺度的裂缝强度预测,还能够对预测的裂缝成因进行分类,更加细致地描述裂缝的空间发育规模及成因。

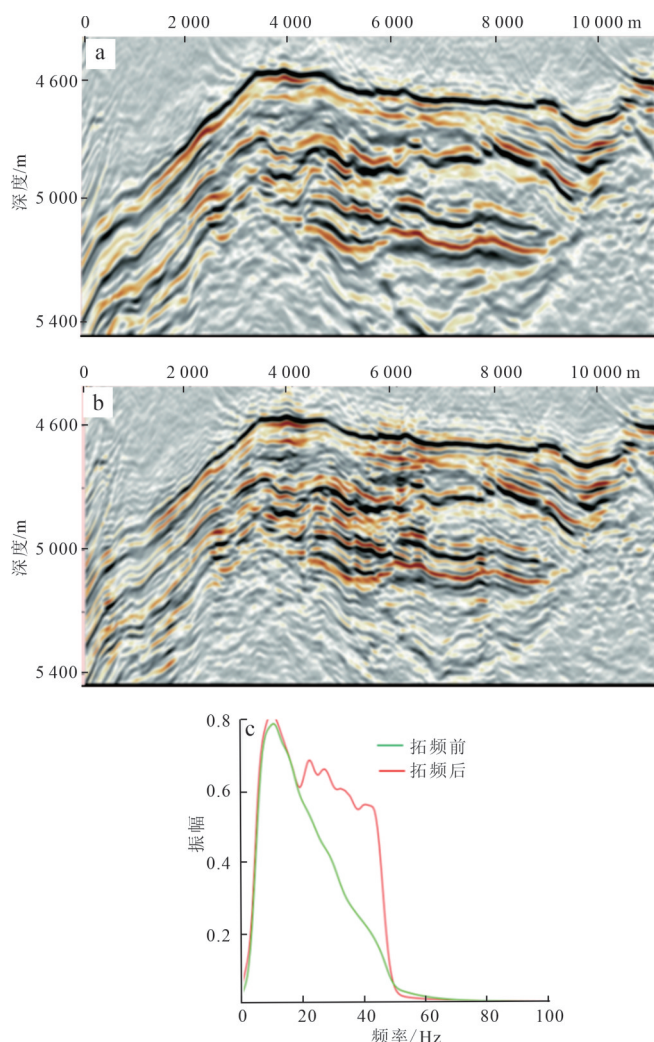


图5 桑托斯盆地F油田叠后深度域地震资料拓频前(a)和拓频后(b)及频带分布对比(c)

Fig. 5 Comparison of seismic data before (a) and after (b) frequency extension and frequency band distribution in post stack depth domain (c), F oilfield, Santos Basin

2.2.1 裂缝叠后地震属性预测

裂缝的地震识别主要有相干、边缘检测、曲率、蚂

蚁体、对称性等方法,这些地震属性都是基于地震反射同相轴的不连续或地震波形的弯曲变化来预测裂缝分布^[22]。但本区这3种属性指示裂缝精度均较低,大尺度裂缝(断层)的成像不清,裂缝发育空间位置不明确,因此常规地震属性对于这种盐下低分辨率地震资料裂缝分布识别并不适用。

近些年来,最大似然体地震属性也逐渐的应用到裂缝检测中^[23-24]。它是Hale在研究断面提取和断距估算时提出的一种高精度地震属性^[25],它预测裂缝的理论基础仍然是同相轴的不连续性,考虑到噪音和地层岩性突变也会造成同相轴的不连续,因此,在提取最大似然体属性之前首先要对原始地震数据体进行适当的滤波,去除随机噪音,压制非断裂引起的同相轴不连续,提升裂缝的成像效果。

研究区连井最大似然体属性裂缝识别剖面(图7)表明:数值越大裂缝发育的可能性越大。从井上岩心裂缝及生产漏失等资料标定分析可得,A井钻至5637 m时发生泥浆漏失与预测的裂缝分布相匹配,C井在5713 m发育斜交构造缝与预测结果相符。因此,最大似然体属性指示裂缝效果好,相对较好地弥补了盐下低分辨率地震资料识别裂缝的不足。

2.2.2 基于构造应力场的裂缝模拟

构造应力场是导致构造变形和断裂的应力场。构造应力场模拟预测方法从裂缝发育形成的地质力学成因出发,探讨裂缝发育控制因素及其与局部构造的联系^[26]。

构造应力是影响裂缝发育的重要因素,构造变形在地层内部引起应力重新分布,产生各种不同的裂缝组系。按照弹性薄板理论,针对背斜等张裂缝的构造,从构造力学出发,利用地层的几何信息(构造面)、岩性信息(速度、密度)估算出地层的应力场,包括地层面的

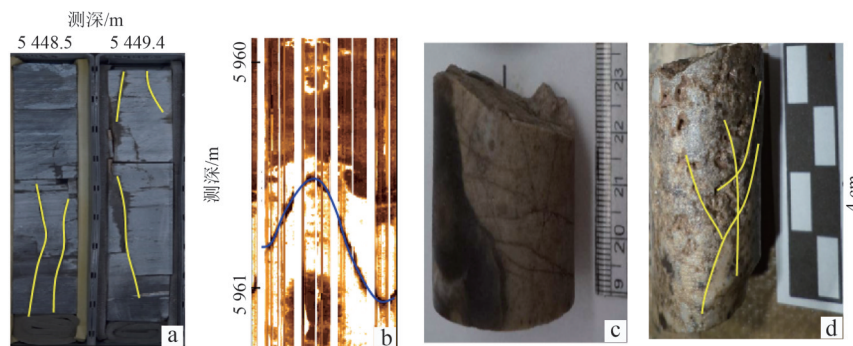


图6 桑托斯盆地F油田岩心与FMI测井信息识别裂缝发育特征规模

Fig. 6 Images and FMI data showing the characteristics and scale of fractures, F oilfield, Santos Basin

a. 大型裂缝岩心照片(A井); b. 大型裂缝成像测井(C井); c. 规则小型裂缝成像测井(A井); d. 不规则小型裂缝岩心照片(C井)

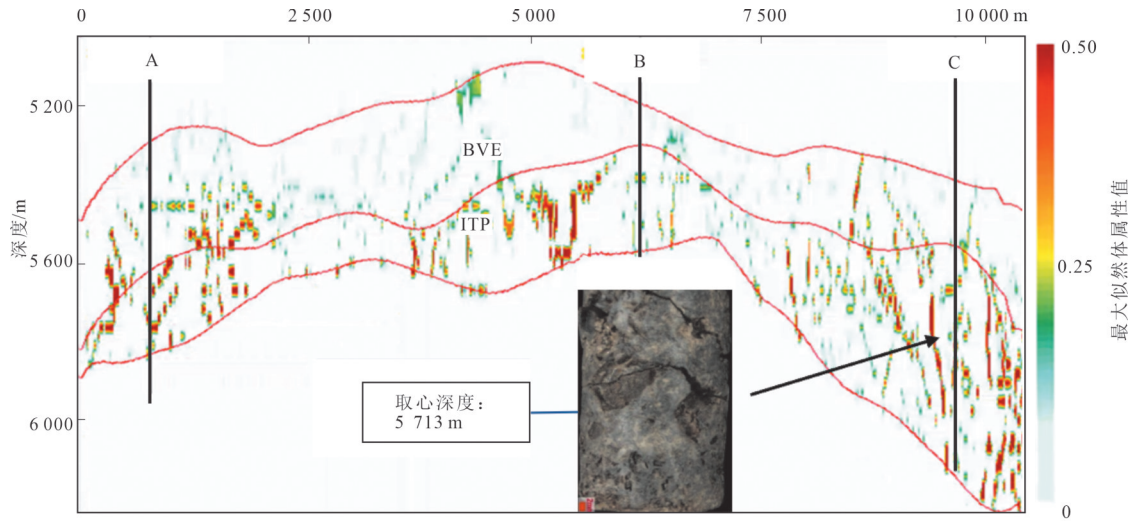


图7 桑托斯盆地F油田最大似然体地震属性剖面(过A井—C井)

Fig. 7 Maximum likelihood bulk seismic attribute profile cross wells A and C, F oilfield, Santos Basin

(注:从绿到红的色标表示裂缝发育程度。)

曲率张量、变形张量和应力场张量,从而得到主曲率、主应变和主应力。进一步,通过三者与裂缝密度、裂缝方向之间的对应关系来预测裂缝的空间展布^[27-29]。

通过该技术模拟的裂缝为构造成因缝,可用来分析本区构造成因缝的分布规律。因为通常构造缝强度分布与断层密切相关,即:距离断层越近,裂缝强度越大;断层断距越大,形成的构造裂缝强度越大。

2.3 溶蚀孔洞地震预测方法

研究区溶蚀孔洞主要为4种类型(图8),即溶孔不发育(图8a)、溶孔零星发育(图8b)、溶孔密集发育(图8c)以及溶洞发育(图8d),表明了研究区受控于沉积和成岩双重作用,溶蚀孔洞发育规模不等,空间分布规律复杂。

通常来讲,利用地震属性定性进行溶蚀孔洞预测都是基于地震数据直接进行的。考虑到本区岩性多样,地震响应复杂,提出了基于灰岩分布范围内的溶蚀孔洞敏感属性预测方法。

2.3.1 灰岩岩性识别及预测

通过井上岩石物理参数交会(图9)可以得出如下规律:①火成岩总体呈高阻抗特征,灰岩的纵、横波阻抗参数与致密灰岩、泥岩和火成岩均存在一定范围的重叠(图9a,b);②孔隙度大于6.5%定义为灰岩储层,孔隙度与密度(波阻抗)有较好的相关性(图9c);③灰岩的CGR参数较低,与其他岩性有较好的区分(图9d)。

采用单一阻抗参数已不能满足灰岩的识别及预测

需求,需联合孔隙度参数反演(图10a)、波阻抗反演(图10b)和CGR拟声波反演(图10c)等地震反演,并基于不同岩性识别的阈值过滤技术,实现对灰岩储层(绿色)的分布规律进行综合预测(图10d),从而在灰岩分布范围内进行溶蚀孔洞的描述。

2.3.2 溶蚀孔洞预测敏感属性优选

理论上讲,当碳酸盐岩中有溶蚀孔洞发育时,必然会引起地震振幅发生变化。鉴于目的层处于盐下,地震资料分辨率低,溶蚀孔洞发育规模小,本次研究对比分析了多种类型数据,如振幅类、能量类和振幅变化类的地震属性,以寻求某一对本区溶蚀孔洞相对敏感的地震属性。其中,地震振幅变化率属性作为一种非均匀储层描述的手段,目前已经成为碳酸盐岩溶洞预测的重要技术手段,尤其针对“串珠状”的大型溶洞预测效果最佳,溶洞越发育,振幅变化率值越大^[29-33]。针对本区小型溶蚀孔洞的预测,在振幅变化率属性成熟应用的基础上,考虑到均方根振幅(RMS振幅)对振幅的变化更加敏感,本次研究提出采用RMS振幅变化率属性,根据这些反射振幅的高强突变信息来预测溶洞发育区。通过大量的岩心及薄片的标定对比发现RMS振幅变化率属性对本区的小型溶蚀孔洞比较敏感,预测结果与井上吻合度较高。

综上,本文提出的缝洞储层的识别与预测方法,在资料处理时选用了针对盐下储层受盐岩影响大,选用谱蓝化拓频处理方法;并从岩性体预测、溶蚀孔洞预测、裂缝预测3个方面选用不同的技术系列开展针对性研究,最后进行有机融合。其中,岩性预测把叠前反

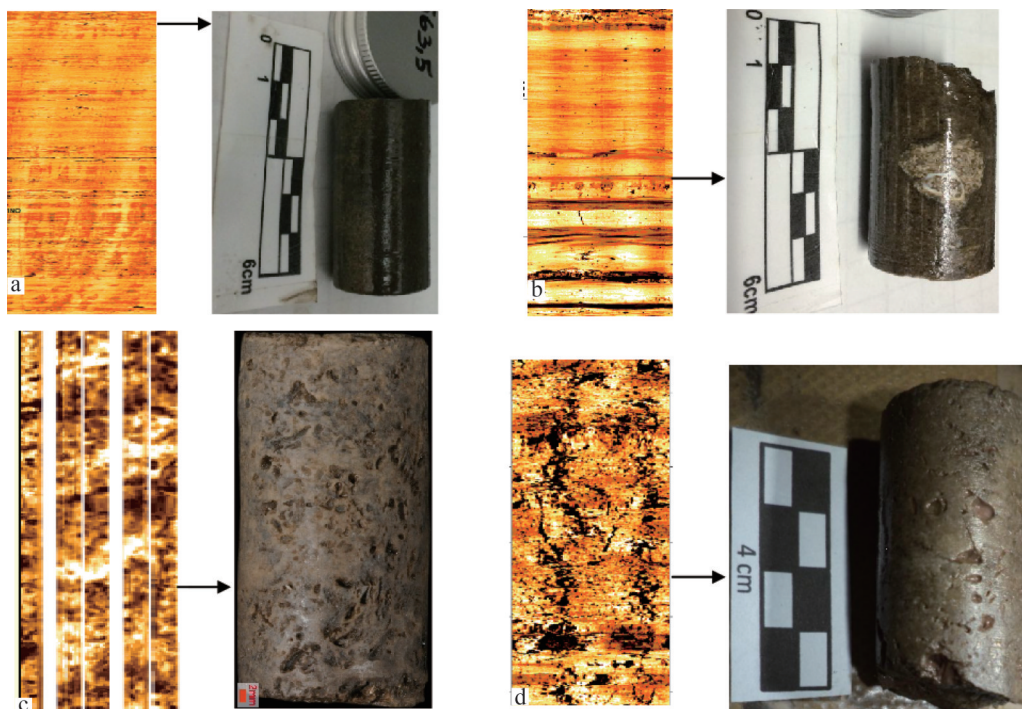


图8 桑托斯盆地F油田典型井岩心照片及FMI测井资料识别溶蚀孔洞

Fig. 8 Identification of dissolution pores and vugs based on integrated core and FMI well-logging data of typical wells, in F oil field, Santos Basin

- a. 溶孔不发育, B井, 埋深5 663.5 m; b. 溶孔零星发育, B井, 埋深5 732.3 m;
c. 溶孔密集发育, C井, 埋深5 780.2 m; d. 溶洞发育, A井, 埋深5 626.6 m

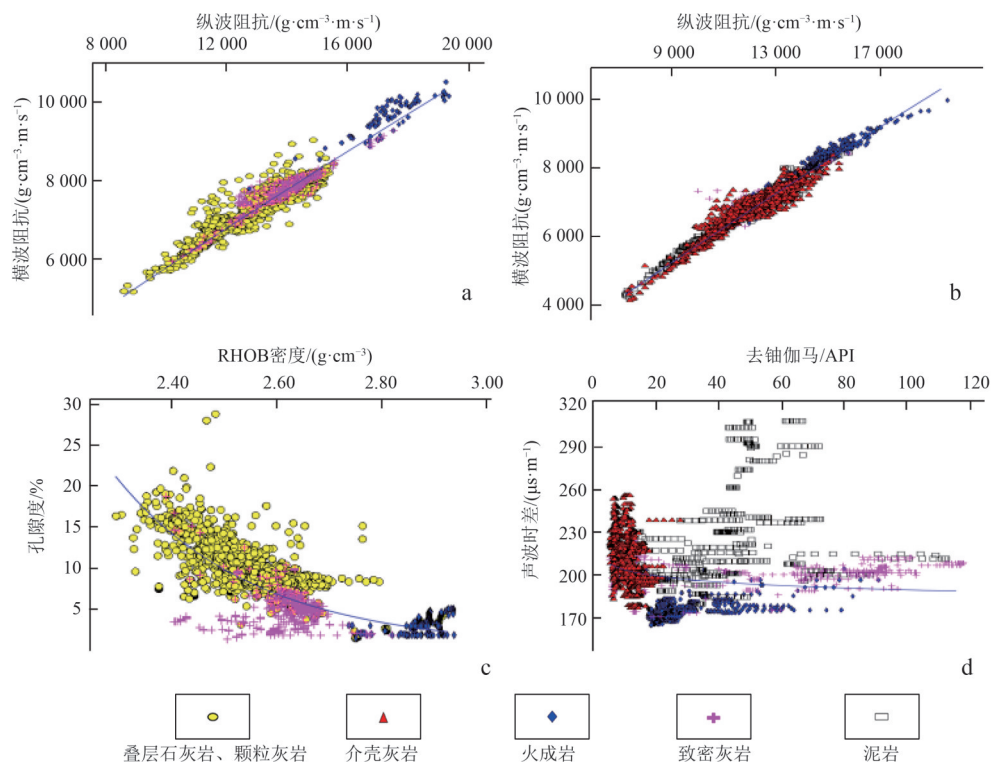


图9 桑托斯盆地F油田不同岩性的岩石物理响应特征

Fig. 9 Petrophysical response characteristics of different lithologies, F oilfield, Santos Basin

- a. 叠层石灰岩-颗粒灰岩-致密灰岩及火成岩阻抗交会图; b. 介壳灰岩-致密灰岩及火成岩阻抗交会图;
c. 孔隙度与密度交会图; d. 不同岩性的声波时差与伽马测井值交会图

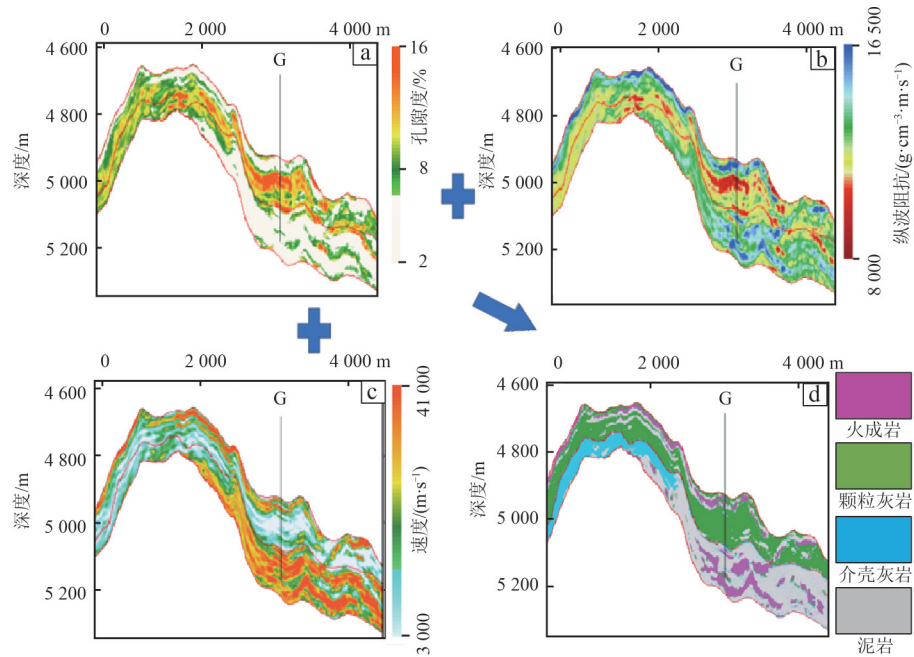


图10 桑托斯盆地F油田地震信息综合岩性预测

Fig. 10 Comprehensive lithology prediction based on seismic data, F oilfield, Santos Basin

a. 孔隙度剖面; b. 纵波阻抗剖面; c. CGR拟速度剖面; d. 岩性预测剖面

演与叠后声波反演结合起来;溶蚀孔洞预测通过地震振幅与能量信息优选敏感地震属性进行预测;而裂缝预测把构造应力场与最大似然属性结合起来。这样的预测方法既体现了多种信息的综合利用,又对盐下湖相碳酸盐岩储层有很强的针对性。

3 缝洞地震预测效果

3.1 裂缝分布地震预测

研究区BVE组和ITP组均可见高角度缝和斜交缝,高角度缝基本为大型裂缝,贯穿深度大,斜交缝多成组出现。高强度裂缝主要密集分布在控构造断层以及背斜顶部,呈条带状展布(图11)。结合分析认为,蓝色趋势线表征的主应力最强,表明构造成因裂缝发育,且裂缝强度与断层密切相关,即距离断层越近,裂缝强度越大;断层断距越大,形成的构造缝强度也越大。

基于构造应力场模拟,按裂缝发育强度应变值统计目的层裂缝发育程度(图12a)与裂缝走向分布(图12b)。不同区域裂缝走向略有不同,但总体呈近北向和北东向两组方向,与岩心显示的裂缝成组发育,两组产状裂缝切割明显的特征相符,这也与研究区主要受裂谷期NWW向和漂移期NEE向两期次构造应力相关,表明裂缝发育以构造成因为主。

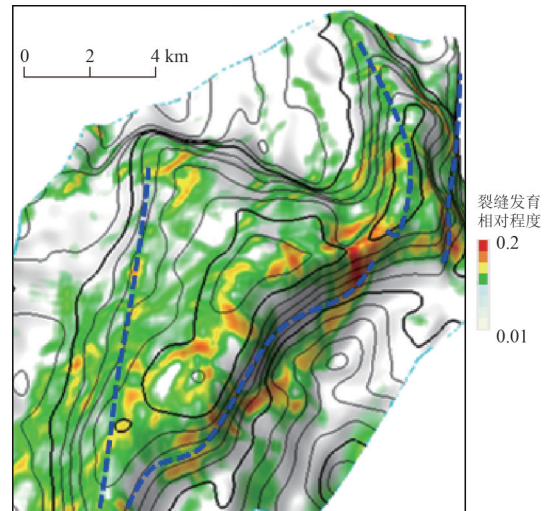


图11 桑托斯盆地F油田裂缝分布与构造叠合图

Fig. 11 Fracture distribution map with structures overlaid,

F oilfield, Santos Basin

(绿色-红色范围代表裂缝发育程度,等值线为构造等值线,蓝色虚线代表含油范围。)

3.2 溶蚀孔洞分布地震预测

溶蚀孔洞主要是受溶蚀性成岩作用为主,有的相对独立发育,也有的局部连片发育。溶蚀孔洞主要集中分布在上ITP亚组顶不整合面附近,发育较多小型溶洞。在裂谷期,本区发育多条早期断裂,控制着局部凹陷和背斜构造,形成了裂谷时期古构造的高低地貌。

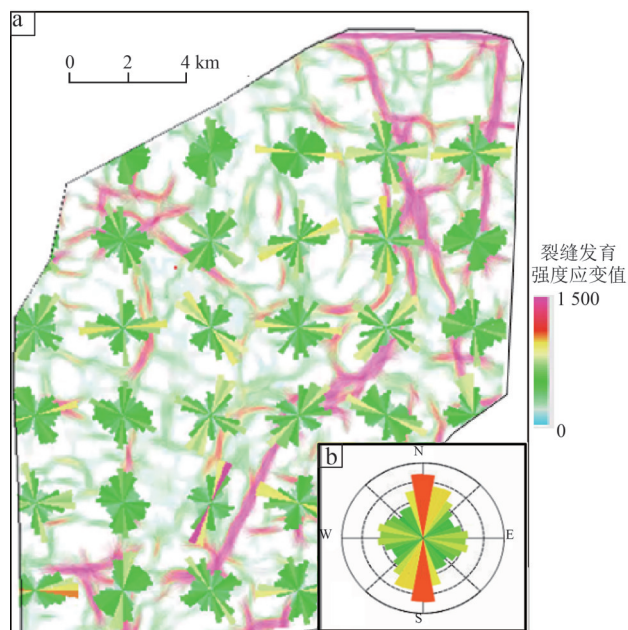


图12 桑托斯盆地F油田裂缝走向统计

Fig. 12 Statistics of fracture strike, F oilfield, Santos Basin

- a. 基于构造应力场模拟的裂缝分布叠合网格单元裂缝走向;
b. 研究区裂缝发育总体走向玫瑰图(暖色代表主要走向方向)

3个亚组(上BVE、下BVE和上ITP)中发育在古构造高及斜坡区(图13),表明了溶蚀作用与古构造关系密切,古构造高是控制溶蚀成岩作用及溶蚀孔洞发育的主控因素之一。

另外,早期断裂和裂缝是地下水运动的主要通道,促进了岩溶作用的发育,使得溶蚀作用常沿着断裂和裂缝发育。构造轴部区发育裂缝,溶蚀作用相应发育,空间上呈现出分区、分带特征(图14a),发育的近南北和北东向溶蚀孔洞条带和裂缝发育带相吻合,

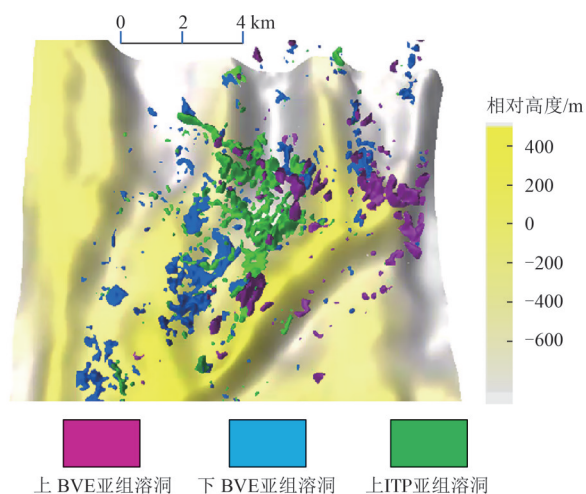


图13 桑托斯盆地F油田溶蚀孔洞分布与古构造叠合图

Fig. 13 Dissolution of pores and vugs superimposed on paleo-structures, F oilfield, Santos Basin

说明构造断裂和裂缝对溶蚀孔洞的发育具有较强的控制作用,如A井FMI测井(图14b)资料所示,也验证了明显的沿裂缝发生溶蚀作用生成小型溶蚀孔洞的特征。

4 结论

1) 桑托斯盆地F油田受复杂沉积和成岩双重作用影响,深水盐下湖相碳酸盐岩的缝洞规模小且发育不典型,预测难度大。本次研究在常规缝洞预测技术基础上进行了改进,联合构造应力场裂缝模拟和最大似然属性进行不同成因裂缝分布的预测;融合地震数据拓频,地震反演和均方根振幅变化率属性预测小型溶蚀孔洞的分布,形成了一套适用于本区盐下多岩性多储集类型的湖相碳酸盐岩小型缝洞预测技术和方法,包括岩性分布、溶蚀孔洞分布及裂缝分布预测3个主要部分。

2) 本区裂缝成因类型较多,但基本以构造成因缝为主,其发育强度与断层及构造主应力相关。溶蚀缝是背斜顶部的构造缝受后期溶蚀作用所形成,与小型溶蚀孔洞伴生发育。裂缝以大型高角度缝和相互切割的斜交缝为主,增强了高孔隙度储层的空间沟通和导流能力,对生产起着重要的作用。

3) 研究区深水盐下湖相碳酸盐岩储层的溶蚀孔洞主要受古构造和断裂、裂缝两主控因素影响,集中分布在下BVE亚组和上ITP亚组不整合面附近,空间分布在古构造高及斜坡区,呈近南北和北东向条带特征。

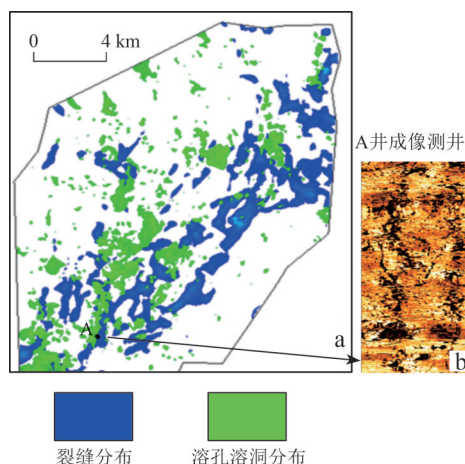


图14 桑托斯盆地F油田裂缝与溶蚀孔洞分布平面叠合图

Fig. 14 Map showing distribution of dissolution pores, vugs and fractures, F oilfield, Santos Basin

a. 裂缝与溶蚀孔洞叠合图; b. F油田A井缝洞发育段成像测井

参 考 文 献

- [1] Christopher J M, Eugene R B. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil(Article)[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 923-945.
- [2] Gomesa J P, Bunevichb R B, Tedeschib L R, et al. Facies classification and patterns of lacustrine carbonate deposition of the Barra Velha Formation, Santos Basin, Brazilian Pre-salt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 1-21.
- [3] Warren J K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons [M]. Berlin: Springer, 2006: 1052.
- [4] Dasgupta S N, Hong M, Al J A. Accurate reservoir characterization to reduce drilling risk in Khuff-C carbonate, Ghawar Field, Saudi Arabia[J]. GeoArabia(Manama), 2002, 7(1): 81-100.
- [5] Yang F, Nie H, Chen H T, et al. Carbonate reservoir prediction with broadband seismic data: A case study from the East Block B of Pre-Caspian Basin[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2019, 58(4): 555-562.
- [6] 杨子川. 塔河油田碳酸盐岩储层预测技术与应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(6): 432-439.
Yang Zichuan. Carbonate reservoir prediction technology and its application in Tahe Oilfield[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(6): 432-439.
- [7] 鲜强, 冯许魁, 刘永雷, 等. 塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 196-204.
Xian Qiang, Feng Xukui, Liu Yonglei, et al. Prestack fluid identification for fractured-vuggy carbonate reservoir in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 196-204.
- [8] Belila A M P, Basso M, Chinellato G F, et al. Pore typing using nuclear magnetic resonance, an example with samples from cretaceous pre-salt lacustrine carbonates in the Santos Basin, Brazil [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107079>.
- [9] 于清艳, 胡向阳, 李勇, 等. 钻遇大型溶洞的油井参数及储层参数动态评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 647-654.
Yu Qingyan, Hu Xiangyang, Li Yong, et al. Dynamic evaluation of well and reservoir parameters on large-scale karst caverns encountered in drilling[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 647-654.
- [10] 贺振华, 杜正聪, 文晓涛. 碳酸盐岩喀斯特溶洞和裂缝系统的地震模拟与预测[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 399-402.
He Zhenhua, Du Zhengcong, Wen Xiaotao. Seismic modeling and prediction of carbonate karst caves and fracture sets[J]. Advanced in Earth Sciences, 2004, 19(3): 399-402.
- [11] 闫相宾, 管路平, 王世星. 塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 828-835.
Yan Xiangbin, Guan Luping, Wang Shixing. Seismic response characteristics and prediction of carbonate rock fracture-vuggy systems in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 828-835.
- [12] Neves F A, Zahrani M S, Bremkamp S W. Detection of potential fractures and small faults using seismic attributes[J]. Leading Edge, 2004, 23(9): 903-906.
- [13] Frietsch, M, Groos, J C, Rithter, J R R. Detection and delineation of a fracture zone with observation of seismic shear wave anisotropy in the upper Rhine graben, SW Germany[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(2): 267-282.
- [14] Li Z J, Wang Y, Yang Z C, et al. Identification of fractured carbonate vuggy reservoirs in the S48 well area using 3D 3C seismic technique: a case history from the Tarim Basin 3D 3C seismic technique[J]. Geophysics, 2018, 84(1): B59-B74.
- [15] Di H B, Gao D L. 3D seismic flexure analysis for subsurface fault detection and fracture characterization[J]. Pure and Applied Geophysics, 2017, 174: 747-761.
- [16] Eric M T T, Mohammed Y A, Youcef B, et al. Extraction and characterization of faults and fractures from 3D VSP data in a carbonate reservoir: a workflow [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106328>.
- [17] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 703-710.
Liu Jun, Ren Lidan, Li Zongjie, et al. Seismic identification and evaluation of deep carbonate faults and fractures in Shunnan area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 703-710.
- [18] 王峣钧, 郑多明, 李向阳, 等. 碳酸盐岩裂缝-孔洞型储层缝洞体系综合预测方法及应用[J]. 石油物探, 2014, 53(6): 727-736.
Wang Yaojun, Zheng Duoming, Li Xiangyang, et al. The fracture-cavern system prediction method and its application in carbonate fractured-vuggy reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(6): 727-736.
- [19] 朱宝山. 子波整形反褶积在提高地震资料分辨率中的研究与应用[D]. 西安: 长安大学, 2013.
Zhu Baoshan. Research and application of wavelet shaping deconvolution in improving the resolution of seismic data [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [20] 曹鉴华, 邱智海, 郭得海, 等. 叠后地震数据的谱反演处理技术及其应用浅析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 387-393.
Cao Jianhua, Qiu Zhihai, Guo Dehai, et al. Post-stack seismic spectral-inversion technique and its application [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 387-393.
- [21] 纪甜甜, 张武, 任红, 等. 谱蓝化拓频处理技术在春光区块的应用[J]. 非常规油气, 2015, 2(3): 22-26.
Ji Tiantian, Zhang Wu, Ren Hong, et al. Application of spectral bluing frequency-broadening technique in Chunguang block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(3): 22-26.
- [22] 宋劲. 地震属性在小断层及裂缝发育带预测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(2): 32-34.
Song Jin. Application of seismic attributes in prediction of small fault and fracture-developed Zone[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(2): 32-34.

(下转第488页)