

塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测

闫相宾,管路平,王世星

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统主要是由多期多旋回溶蚀、成岩和构造破裂作用形成的有成因联系的有效缝、洞及其所连通的孔、洞、缝构成的网络状储集体;缝洞系统的发育程度和规模是奥陶系碳酸盐岩油气成藏和稳产、高产关键。目前的地震技术方法难以检测和识别单个较小的孔洞缝,但由诸多孔洞缝组成的一定规模的缝洞系统是可以有效检测和预测,且地震波的动力学参数对识别和检测缝洞系统较运动学属性参数更为敏感可靠。缝洞系统的检测可以利用相干体分析、振幅属性、多尺度裂缝检测、频率差异分析和波阻抗反演等技术进行优化组合,但不同地区、不同成因、不同规模的缝洞系统需利用不同的方法技术组合去表征。

关键词:缝洞系统;地震响应及预测;碳酸盐岩;塔里木盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Seismic response characteristics and prediction of carbonate rock fractured-vuggy systems in the Tarim Basin

Yan Xiangbin, Guan Luping, Wang Shixing

(Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The fractured-vuggy system of the Ordovician carbonate in Tarim Basin is defined as network-like reservoirs composed of effective fractures and vugs formed by multistage and multicycle of dissolutions, diagenesis, and fracturing. Generally, the scale and extension of fractured-vuggy system is critical to hydrocarbon accumulation in the Ordovician and stable and high production from Ordovician reservoirs. The present seismic technologies are still insufficient in detecting and distinguishing single small fractures or vugs. However, larger fractured-vuggy system consisted of many fractures and vuggies can be effectively detected and predicted, especially with the help of seismic wave dynamic parameters, which are much reliable than kinematics parameters. The detection of fractured-vuggy system can be achieved through integration of the following techniques: coherence analysis, amplitude attributes, multi-scale fracture detection, frequency difference analysis (FDA), and wave impedance inversion. However, fractured-vuggy systems of different origins and sizes in different areas require different combinations of these techniques and methods.

Key words: fractured-vuggy system; seismic response and prediction; carbonate rock; Tarim Basin

塔里木盆地油气勘探重要目的层之一的中-下奥陶统为一套浅海台地相的碳酸盐岩^[1~3],岩性主要为颗粒灰岩、微晶灰岩、藻粘结灰岩和云灰

岩等。奥陶系基质绝大多数的孔隙度小于1%,平均值为0.67%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔低渗的非有效储层。储层是多期多旋回溶蚀和

收稿日期:2007-08-23。

第一作者简介:闫相宾(1964—),男,教授级高级工程师,油气地质。

构造破裂作用形成的有成因联系的缝、洞及其所连通的孔、洞、缝构成的网络状储集体。由于碳酸盐岩次生缝洞系统在时空上具有较强的非均质性使不同地区、不同层段油气富集程度和性质差异较大。因此碳酸盐岩缝洞系统的预测评价及准确圈定^[4~6]是塔里木盆地奥陶系油气勘探成败的关键所在。

1 地震地质基础与地震响应特征

1.1 地震波传播特征

地震波在网络状缝洞系统中的传播特点与一般介质中的传播有显著的差异:1)缝洞系统对地震波有较强的吸收和衰减作用;2)缝洞系统是一个地震低速异常体;3)缝洞系统易造成地震波的散射和绕射,地震响应特征明显。在地震剖面上,缝洞系统常表现为相干性差、反射杂乱、同相轴时强时弱、断续出现或存在复合波等异常的地震响应特征。4)不同裂缝系统的纵、横波响应特征有别,可以利用纵波不同方位的振幅特性判断裂缝的走向,也根据快、慢横波的时差、波形、振幅衰减、频率变化等研究裂隙的方位。

1.2 缝洞系统预测的有利地质条件

1)下奥陶统主要为一套浅海台地相的碳酸盐岩沉积,沉积环境单一,岩性以灰岩为主,为排除岩性异常(因岩性不同而产生的异常)的多解性提供了地质方面的有利条件。

2)下奥陶统地层坚硬、致密,声波测井速度通常在6 200 m/s以上,其顶界以不整合面与上覆地层的砂泥岩接触,泥岩声波速度一般在4 000~4 700 m/s。这使得下奥陶统顶界一般都有一个较清晰的反射界面,在地震剖面上表现为一个强而稳定的反射同相轴,可作为全区标志波。

3)下奥陶统内部如果缝洞系统不发育时,反射同相轴通常稳定而简单,变化不大,但当缝洞系统发育时,则会出现不规则的反射,易于检测,通常表现为同相轴连续性差、强振幅、低速度等特征。

4)奥陶系缝洞系统发育时,可造成层速度、波阻抗和吸收系数明显降低的现象,一般含油气缝洞系统的层速度可以降低10%~25%,而成岩

作用造成的岩性变化(硅化、白云岩化等)所引起的层速度变化多在1%~3%。

1.3 碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征

1.3.1 地震波几何学特征

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统的(风化壳下近250 m)^[5~14]地震反射特征:一是杂乱强反射特征(复杂波场),如塔河3、塔河4区奥陶系缝洞系统内部反射结构;二是杂乱反射向层状反射的过渡带(复杂波场—简单波场,如塔河6区);三是弱反射和层状反射(简单波场,如塔河南平台区)。对于奥陶系地层,层状反射和空白弱反射代表了沉积界面或阻抗差异界面,与地层、岩性紧密相关;但局部的杂乱反射反映了规则及非规则干扰波场的存在,由此可以推测碳酸盐岩缝洞系统发育带;尤其是当碳酸盐岩缝洞系统极为发育时常能引起严重的绕射波,并造成能量的大量散射和吸收,地震波场变得非常复杂,目前处理技术难于从这种复杂的反射波场中将多种效应分离出来,所以只能描述后期形成的非岩性的复杂的内部结构。

1.3.2 地震波动力学特征

1) 振幅特征

当碳酸盐岩顶面发育缝洞系统时,与上覆介质的波阻抗差异降低形成弱反射。当碳酸盐岩内幕发育缝洞系统时,与周围介质的波阻抗差异明显增大,形成相对强反射。根据这一特征,可以利用碳酸盐岩储层内幕的振幅特征来进行缝洞系统的检测。同时由于绕射、散射难以完全归位,相对强振幅的展布范围比实际缝洞系统范围更大。

2) 频率特征

碳酸盐岩缝洞系统中的流体,会使地震反射的频率降低。在碳酸盐岩内幕缝洞系统使地震波反射频率低于噪音背景。因而利用频率特征能较好地进行缝洞系统检测,如频率差异法就是该类方法的典型代表。

3) 道间相异性

碳酸盐岩缝洞系统的分布和形状无章可循,当某一区域的缝洞系统比较发育时,会产生一些杂乱反射,带来相邻地震道间反射的无序性(即

地震道的相异性),裂缝越发育,这种相异性越明显。利用地震的相异性能对多个裂缝(或较大裂缝)进行研究,从而定性地了解裂缝的发育程度。

2 碳酸盐岩缝洞系统预测的方法技术

2.1 频率差异分析技术

频率差异分析(FDA)技术是以波动方程傅里叶解为基础,利用主频为20~30 Hz的常规地震资料提取充填流体溶洞的振幅-频率异常和速度异常,圈定溶洞空间分布,确定其边界并估算其高度。实验分析表明,塔里木盆地奥陶统碳酸盐岩纵波速度大约为5 500~6 000 m/s,密度为2.5~2.7 g/cm³,而碳酸盐岩缝洞系统中的流体纵波速度小于等于1 500 m/s,流体密度小于等于1 g/cm³,溶洞壁的反射系数大于等于0.8(假定溶洞横向尺度无限)。因此当溶洞高度大于1/4波长时,顶底面反射波分开,形成复波,其振幅与顶底面的反射系数 r 成正比。当溶洞高度小于1/4波长时,其顶底面反射波叠合,形成复合反射波,其反射振幅与顶底面复合反射系数成正比。尤其是当溶洞中充填流体(液体)时,流体速度比其围岩碳酸盐岩低4 000 m/s左右。地震速度反演呈现低速特征,并

形成很强的复合反射波。模型模拟试验表明,随着溶洞宽度由小变大,振幅由弱变强,而洞高对振幅变化影响不大。从塔河油田三维地震的FDA异常(图1)反映的岩溶洞穴看主要在风化面下100 ms以内,100 ms下方仍有异常;FDA异常以串珠状为主,从浅至深异常由密变稀、由强变弱,并具有明显的分层性,在塔河油田6区和4区近于水平,在南平台近于层状。

2.2 基于数据协方差矩阵本征结构的不连续检测技术

该技术的核心是将叠前速度谱扫描中的本征值所拥有的相似性计算思路和方法引入三维叠后数据分析,计算特定样点处地震道之间相似程度的相关。用一个介于0~1之间的相干测量就可将地震连续性和断续性定量化,并将其转换成揭示碳酸盐岩缝洞系统细微地质特征的可视图像。优点:1)不完全受选择道数多少的影响,只与参与计算的线性无关的道有关,不会像基于互相关的相干算法,随计算道的增加而降低空间分辨率;2)互相关只考虑与中心道的关系,而协方差矩阵分析的是所有参与计算道之间的相互关系,因而有较高的可信度及信噪比;3)解决了多道互相关中空间权平均的人为因素,更加适用于低信噪比的资料。

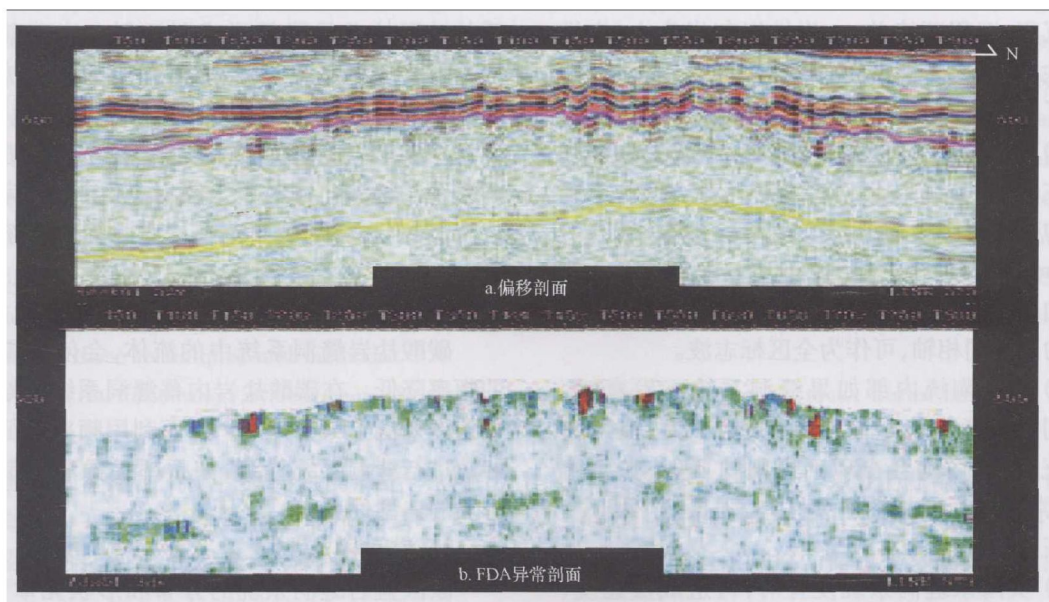


图1 频率差异分析(FDA)异常剖面(373测线)和对应的保幅偏移剖面

Fig. 1 Abnormal section of frequency difference analysis(inline 373) and corresponding amplitude-preserving migration section

2.3 时频域衰减因子提取技术

2.3.1 时频分析方法

对信号的刻画通常采用时域形式和频域形式。实际问题中最关心的是信号在局部范围的特征,这就需要借助时频分析法。目前时频分析主要有主参数分析和谱分解技术:主参数分析通过提取表示信号特征的主振幅、主频率等参数,研究碳酸盐岩缝洞系统在横向上的变化特征;谱分解技术通过目的层的短时窗频率切片观察碳酸盐岩缝洞系统的横向变化规律,即“目的层的谐振立方体”。

2.3.2 衰减因子提取方法

碳酸盐岩缝洞系统的存在导致地震波穿过碳酸盐岩缝洞系统介质时会受到较大的畸变,即介质非均质引起地震波能量、频率等特征的改变,运用对应时窗内反射波记录分析其吸收衰减量,有助于刻画碳酸盐岩缝洞系统的地球物理平均特性。具体实现时,根据目标层位的解释,分别选取相邻的两个时窗,两个时窗的中点间距对应于目标层。在短时傅里叶变换的基础上,分别提取相邻时窗的能谱,计算衰减因子。

如塔河油田缝洞系统从三维地震 T_7^4 反射层

等频率 32 Hz 和 48 Hz 衰减因子切片(图 2)看出在 32 Hz 等频切片中,缝洞系统的衰减量分布不规则,平面上变化大。

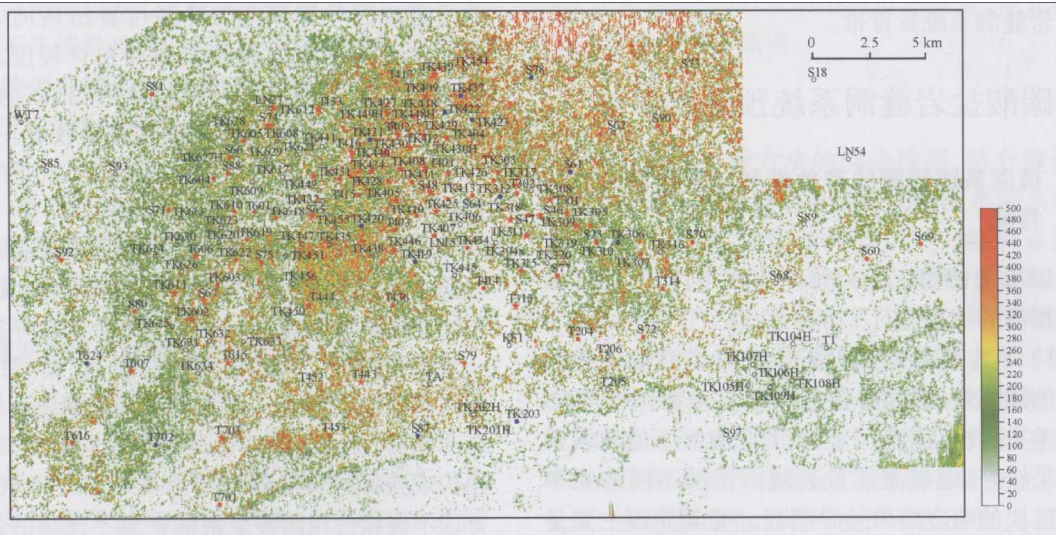
其中 TK427 - S48 井区、TK602 - S67 - TK603 井区、S74 - S66 - TK604 - S71 井区、T301 - TK305 - TK309 - TK307 井区的衰减量明显增大,高衰减量位置与该区大型溶洞位置对应。48 Hz 等频切片(图 3)反映高频率衰减量,塔河的 4 区、3 区、6 区均分布有高吸收区带,主要集中在 TK427 - TK407 井区和 S47 - S46 - T313 井区及 S74 - S67 井区附近,这些高衰减区对应的均是缝洞系统发育的有利部位。

2.4 地震反射结构分析方法

碳酸盐岩缝洞系统一方面吸收地震波的能量,另一方面碳酸盐岩缝洞系统边界的不规则,产生绕射波,相互干涉,还与反射同相轴干涉,引起反射振幅异常和反射结构变化,这些现象可有助于识别检测大型缝洞系统。S48 井在奥陶系顶面就出现了一个眼球状振幅异常,钻井证实振幅异常对应为一个大型缝洞系统。

2.5 地震属性及相干体技术

地震属性是表征地震波几何形态、运动学特征、动力学特征和统计特征的物理量,因此用地震



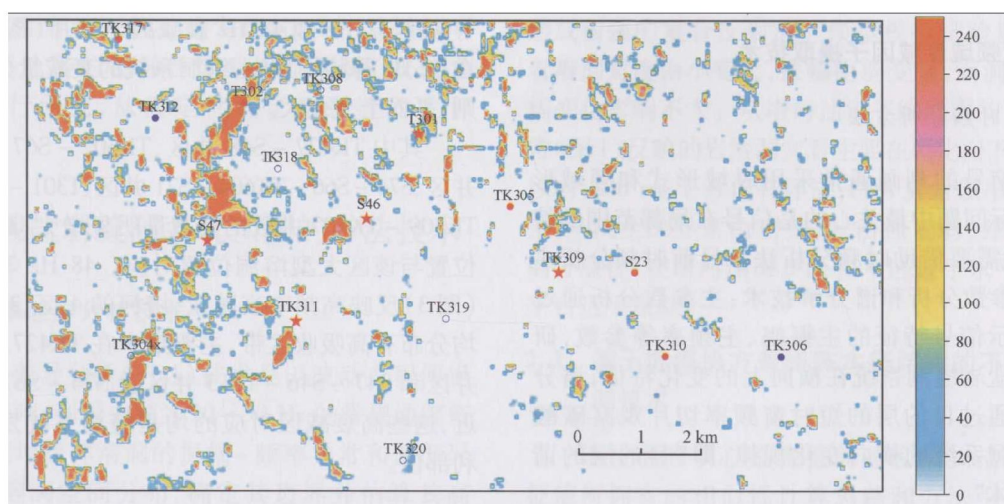


图3 塔河油田3区(T_7^4)48 Hz衰减因子等频率切片图

Fig. 3 Isofrequency(48 Hz)slice of attenuation factors at the top of the Upper Ordovician(T_7^4) in Block 3 of Tahe oilfield

记录的振幅、频率、相位或统计特征分类(振幅、复数道、频谱、序列及相关等统计类)可预测分析相关地质特征。而相干体技术是通过地震道的相似性分析,将三维振幅数据转化为相关系数数据体,突出其不相关异常的分析技术。其原理认为地层是连续的,横向上是一种渐变,地震波在横向上就有相似性。当存在缝洞系统时,相似性就会被破坏,表现为边缘突变的非相似性。通过相似部分或非相似部分的纵横向连续作图,就可辨别出碳酸盐岩缝洞系统发育带。

3 碳酸盐岩缝洞系统预测及评价

3.1 缝洞系统预测的有效性和地震异常分布的特征

以塔河油田173口钻井为样本,对上述方法技术预测的效果进行了分析评价。

1) 不连续性检测分析方法对塔河油田缝洞系统的预测效果最好,吻合率在77.0%~95.7%;频率差异分析对塔河3区和塔河南盐下的地震预测效果较好;地震波能量衰减因子的不同的频率在各区块的响应结果差异明显。究其原因主要是由于不同储层类型对不同频带的地震波的吸收系数有所差别造成的,一般高频衰减对岩溶洞穴型储层为主的地震预测效果最好(如塔河4区的51

口钻井的吻合率可达90.5%),而对塔河3区以裂缝型储层为主的地震预测的效果差些,钻井的吻合率仅有59.0%。

2) 不同地区、不同成因、不同规模的缝洞系统预测的技术方法有别。

塔河3区的缝洞系统对本征结构不连续性检测、多尺度裂缝检测、频率差异分析较为敏感,同时用地震波能量衰减因子、强振幅聚类分析及地震属性分析技术也可较好地预测。从地震波能量衰减因子等频率切片图可看出塔河3区不同部位缝洞系统的展布方向和发育程度。其中缝洞系统发育带的方向以北北西、北东向为主,而缝洞系统发育程度与高频衰减吸收成正比,塔河3区的西部、北部的能量衰减大,相应的缝洞系统发育。

塔河4区的缝洞系统的预测主要采用不连续性检测分析和强振幅聚类检测确定储层发育区,再结合地震波能量衰减因子、FDA异常等技术进一步核验佐证。区内溶洞十分发育,溶洞的钻遇率高达90%。塔河4区发育多套大型岩溶洞穴系统和暗河,加之多期构造运动形成的断裂、裂缝相连构成独特的岩溶缝洞网络系统,在溶洞极为发育区不连续性检测多呈杂乱密集不连续的强异常分布(淡兰色区)(图4);当不连续性检测呈叶脉状(TK424井所在的较小区域)、麦穗状(T416—TK431—TK432—S65—线)或条带状(T401井、

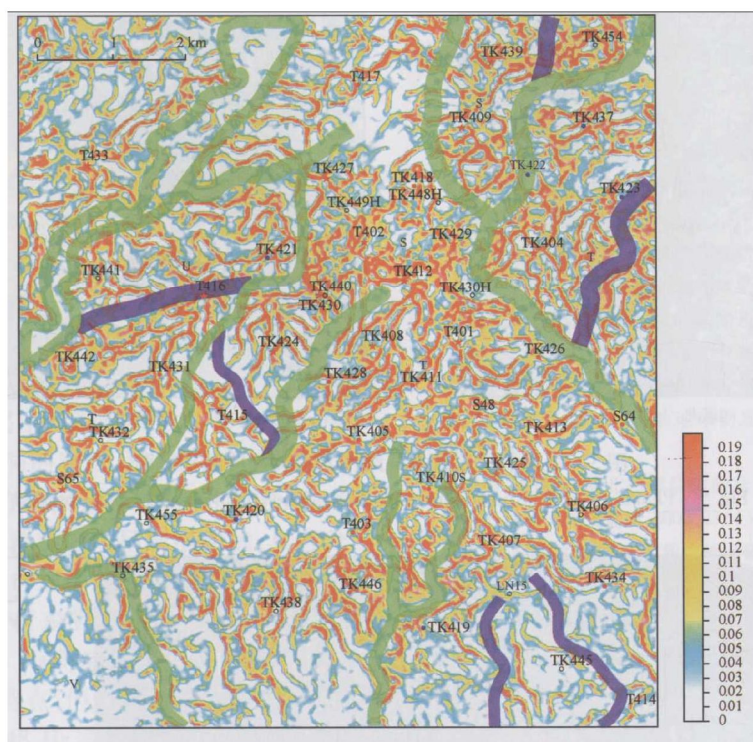


图4 塔河油田4区本征结构不连续性检测的平面图

Fig. 4 Planar view of intrinsic structure discontinuity in Block 4 of Tahe oilfield

TK404井所在区域)的不连续性的强异常分布(淡黄、淡绿区)时指示缝洞型储层相对发育;当显示为不连续性的弱异常分布(白色区)时储层发育欠佳。

塔河南部盐体之下缝洞系统的预测主要用本征结构不连续性检测、地震相干和强振幅聚类检测等方法划分储层发育区,参照地震波能量衰减因子、FDA异常及地震反射特征等参数进一步核评价。

3) 用地震波的动力学参数(振幅、频率、相位、衰减等)识别和检测缝洞系统较运动学属性参数(速度、走时等)更为敏感且可靠。

3.2 塔河油田6区缝洞系统预测评价

3.2.1 预测

塔河6区张裂隙和岩溶洞穴型储层发育。其中缝洞系统发育的TK604-TK612-TK605井区和T615-TK611-TK625-T615井区的本征结构不连续性检测呈网状或条带状分布,连续性差(图5);同时10~20 ms和20~120 ms强振幅聚

类检测均呈强异常密集分布且强异常带重合;地震波能量衰减因子异常高值连片。而6区中北部缝洞系统相对发育带,在本征结构不连续性检测呈条带状展布,强振幅聚类深浅层异常重合,衰减因子呈星点状分布,表明溶洞虽然发育,但充填严重,裂缝发育程度减弱。

3.2.2 评价

通过上述多种方法的综合检测,结合缝洞系统的地质成因预测模式可将塔河油区奥陶系缝洞系统储层划分为3类:即Ⅰ类区——缝洞系统极发育区;Ⅱ类区——缝洞系统发育区;Ⅲ类区——缝洞系统相对发育区(图6)。其中Ⅰ类区可进一步细分为Ⅰ₁区——主要是塔河油田4区和6区主体,位于塔北阿克库勒凸起轴部与岩溶缓坡上的丘丛的叠合部位,也是3套岩溶洞穴与构造裂缝和风化裂隙最发育的叠合区,缝洞系统极为发育;Ⅰ₂区——主要分布于塔河油田4区、6区、7区及3区部分地区,为岩溶洞穴、构造裂缝、风化裂隙、溶蚀孔隙型储层的发育区,缝洞系统较发育;Ⅰ₃区——主要分布于塔河油田5区、3区和1区部分

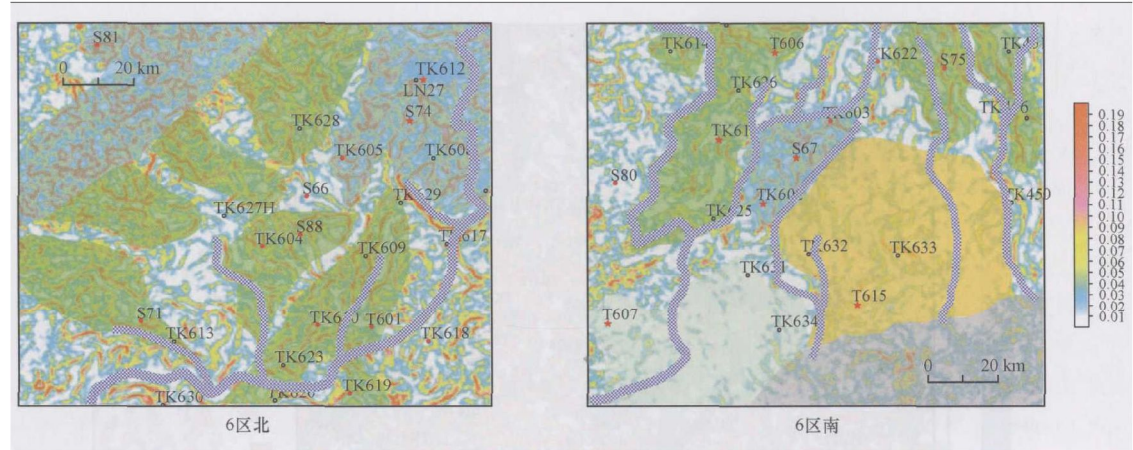


图5 塔河油田6区本征结构不连续性检测平面图

Fig. 5 Planar view of intrinsic structure discontinuity in Block 6 of Tahe oilfield

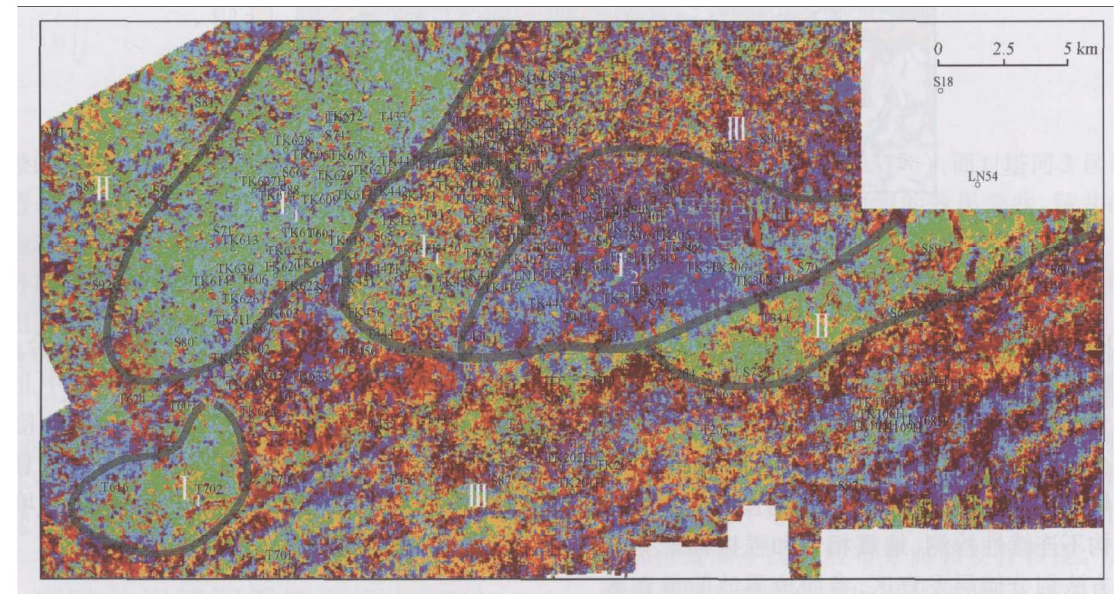


图6 塔河油田下奥陶统储层地震相分区图

Fig. 6 Seismic phase zonal map of the Lower Ordovician reservoirs in Tahe oilfield

I₁. 最佳岩溶缝洞分布区; I₂. 最好岩溶缝洞分布区; II. 一般岩溶缝洞分布区; III. 较差岩溶缝洞分布区

地区,缝洞系统发育,是本区较好储层分布区。II类区主要分布在 S81 井—S93 井—S92 井一线以西和石炭系盐岩体边界附近,风化裂隙和岩溶洞穴型储层发育一般,但溶蚀孔隙型储层和构造裂缝型储层发育,整体看缝洞系统仍发育。III类区主要分布于塔河油田南部,为奥陶系桑塔木组碎屑岩覆盖区,海西早期岩溶洞穴型储层欠发育,加之构造变形作用较弱,储层类型单一,主要是加里东中期分布局限的裂缝型储层和溶蚀孔隙型储层,缝洞系统相对发育区或欠发育。

4 结论

- 1) 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统的检测和预测具有有利的地震地质基础,目前的方法技术难以检测和识别单个较小的缝洞,但可有效检测和预测由诸多缝洞组成的缝洞系统,而且用地震波的动力学参数识别和检测缝洞系统较运动学属性参数更为敏感且可靠。
- 2) 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统检

测、预测的有效方法组合是:相干体分析、振幅属性、多尺度裂缝检测、频率差异分析(FDA)和波阻抗反演等。但地震波受缝洞系统所产生的绕射、散射、吸收影响,表现出极强的分带分区特征,需利用不同的方法技术组合去表征不同地区、不同成因及不同规模的缝洞系统。

3) 多尺度裂缝检测揭示构造斜坡带的裂缝比顶部发育,陡坡比缓坡发育,表明地震检测裂缝结果与构造解释出的不同尺度的裂缝和断层吻合率较高。

4) FDA技术揭示溶洞绕射波偏移收敛后形成短反射强度与溶洞的宽度及高度有密切关系,需进行宽度校正。在剖面上FDA异常主要分布在风化面以下100 ms范围之内呈现串珠状,具有分层特征,平面上呈现非规则线性分布。

5) 衰减因子分析表明,在32~48 Hz范围内衰减幅度较大,32 Hz等频率切片中衰减量分布虽呈不规则变化的特点,但缝洞发育的塔河4区、6区衰减明显偏大;48 Hz等频率切片反映高频相对应的高衰减量分布区是缝洞发育的较有利部位。衰减因子可为局部区域有利储集带的定界提供一个相对洞缝发育的部位。

参 考 文 献

- 1 叶德胜,王根长,林忠民,等.塔里木盆地北部寒武—奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气前景[M].成都:四川大学出版社,

2000. 17~28

- 2 俞仁连.塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义[J].石油实验地质,2005,27(5):268~278,472
- 3 李红南,魏垂高,张世奇,等.塔里木盆地塔中地区志留系成藏控制因素[J].油气地质与采收率,2006,13(3):43~49
- 4 黄捍东,魏修成,叶连池.碳酸盐岩裂缝性储层研究的地质物理基础[J].石油地球物理勘探,2001,36(5):591~596
- 5 龙建东,徐安娜,李明.缝洞型碳酸盐岩内部局部振幅横向差异性储层预测法[J].石油地球物理勘探,2003,38(1):58~61
- 6 王者顺,王尚旭,唐文榜.塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及频率差异分析[J].石油与天然气地质,2004,25(1):93~96
- 7 王秀玲,孟宪军,李玉新.潜山裂缝储层地震多信息综合预测方法及应用实例[J].石油地球物理勘探,2002,37(增刊):196~201
- 8 李宗杰,王勤聪.塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术[J].石油与天然气地质,2002,23(1):35~40,44
- 9 徐峰,杨金华,张耀堂,等.轮南地区碳酸盐岩油气藏的地震响应特征[J].石油与天然气地质,1999,20(3):228~231
- 10 闫相宾,韩振华,李永宏.塔河油田奥陶系油藏的储层特征成因机理探讨[J].地质论评,2002,48(6):178~184
- 11 文晓涛,贺振华,黄德济.缝洞岩层地震波反射特征分析[J].勘探地球物理进展,2003,26(2):100~108
- 12 李江龙,黄孝特,张丽萍.塔河油田4区奥陶系缝洞型油藏特征及开发对策[J].石油与天然气地质,2005,26(5):630~633
- 13 李明娟,张永贵,邬兴威,等.塔河南部地区碳酸盐岩油气预测技术研究[J].石油与天然气地质,2006,27(4):536~541
- 14 韩革华,漆立新,李宗杰,等.塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):860~870

(编辑 陈喜禄)

(上接第820页)

参 考 文 献

- 1 赵文智,王红军,单家增,等.库车坳陷天然气高效成藏过程分析[J].石油与天然气地质,2005,26(6):703~710
- 2 贾承造,宋岩,魏国齐,等.中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集[J].地学前缘,2005,12(3):3~13
- 3 秦胜飞,贾承造,陶上振.塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征[J].中国地质,2002,29(1):103~108
- 4 卢华复,陈楚铭,刘志宏,等.库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J].石油学报,2000,21(3):18~24
- 5 沈军,吴传勇,李军,等.库车坳陷活动构造的基本特征[J].地震地质,2006,8(2):269~278
- 6 何登发,贾承造,李德生,等.塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J].石油与天然气地质,2005,26(1):64~77
- 7 汤良杰,贾承造,皮学军,等.库车前陆褶皱带盐相关构造样式

[J].中国科学(D辑),2003,33(1):38~46

- 8 邬光辉,王招明,刘玉魁,等.塔里木盆地库车坳陷盐构造运动学特征[J].地质论评,2004,50(5):476~483
- 9 王毅,宋岩,单家增.构造应力在油气运聚成藏过程中的作用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):563~571
- 10 李振生,刘德良,杨强.库车褶皱冲断带断裂、构造对油气藏的控制作用[J].天然气工业,2007,27(5):36~38
- 11 汤良杰,余一欣,杨文静,等.库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J].地质学报,2007,81(2):145~150
- 12 邬光辉,罗春树,胡太平,等.褶皱相关断层——以库车坳陷新生界盐上构造层为例[J].地质科学,2007,42(3):496~505
- 13 何登发,Suppe J,贾承造.断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J].地学前缘,2005,12(4):353~364

(编辑 李 军)