

基于正演模拟的碳酸盐岩缝洞体系连通性分析

杨敬雅, 李相文, 朱冬辉, 闫顺来, 张 明, 毕姣莹

(中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩储层发育, 由洞、孔、缝之间的不同组合所形成的缝洞型油藏是主要研究目标。缝洞连通性是油田勘探开发实践中高效井优选的重要依据, 对于缝洞型油藏的解剖认识与开发均具有重要意义。本文通过模型正演技术, 建立相对简单的缝洞地质模型并获取炮集资料, 采用 GeoEast 处理解释系统, 分析采集参数与资料处理参数对缝洞体之间的连通性分析的影响, 进而认识地震波通过连通缝洞体时可能的地震反射特征, 指导缝洞连通性的解释。通过对地震瞬时振幅解释等方法的探索及应用, 可以在一定程度上区分缝洞体之间的地震波场差异。该方法可推广应用于地质特征相似的区域。

关键词:碳酸盐岩 缝洞体系 模型正演 地震资料处理 缝洞连通性

中图分类号: TE122

文献标志码: A

Connectivity analysis of carbonate fracture – cave system based on forward modeling

YANG Jingya, LI Xiangwen, ZHU Donghui, YAN Shunlai, ZHANG Ming, BI Jiaoyin

(Bureau of Geophysical Prospecting (BGP) Company of CNPC, Korla 841000, China)

Abstract: The Ordovician carbonate reservoirs in Tarim Basin are well developed. Fractured – vuggy reservoirs formed by different combinations of caves, holes and fractures are the main research targets. Fracture – cave connectivity is an important basis for optimizing high – efficiency wells in oilfield exploration and development practice, and is of great significance to the understanding and development of fracture – cave reservoirs. In this paper, a relatively simple geological model of fracture and cave is established by forward modeling technology, and gun – gathering data are obtained. GeoEast processing and interpretation system is used to analyze the influence of acquisition parameters and data processing parameters on the connectivity analysis between fracture and cave bodies. Then, the possible seismic reflection characteristics of seismic waves passing through the connected fracture and cave bodies are recognized, to guide the interpretation of fracture – cave connectivity. By exploring and applying the methods of seismic instantaneous amplitude interpretation, the difference of seismic wave between fracture and cave bodies can be distinguished to some extent. This method can be extended to areas with similar geological characteristics.

Key words: carbonate rock; fracture – cave system; model forward modeling; seismic data processing; fracture – cave connectivity

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩发育广泛, 储层类型多样, 具有极强的储层非均质性, 且流体性质多变。钻探结果表明, 塔北、塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层油气资源丰富^[1-2], 但各油藏的开发差异巨大。随着高精度勘探开发一体化进程的不断推进, 对大型缝洞集合体的储层连通性分析提出更高的要求。

在油藏开发过程中, 通常用储层连通性来表征储集层连通效果^[3-5], 可直接影响油藏生产的受效

情况, 同时也可以反映注水潜油或注水驱油等手段

收稿日期: 2019-01-03; 改回日期: 2019-03-05。

第一作者简介: 杨敬雅(1986—), 女, 工程师, 主要从事高效解释方法研究和基地管理工作。E-mail: rusmile@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发—塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(2016ZX05053-17)。

的实施是否达到油藏开发设计的效果,其次可以间接了解油藏内剩余油的情况^[6]。模型正演技术是地震资料解释中深入认识地下缝洞体系真实地质特征的重要手段,其中缝洞体模型精细波动方程正演是地震勘探开发中的一种重要方法,该技术目前在塔里木盆地多用于山前构造解释结果的验证和碳酸盐岩缝洞体储集空间计算结果的校正^[7-8]。地震数据处理是地震采集、处理与解释中的重要环节,如何有效消除炮集数据中可能存在的无效反射波,通过偏移成像恢复真实的地质结构,是处理人员需要认真思考的问题。早期的地球物理工作者主要通过对地震(二维、三维地震或井间地震)解释并借助野外露头资料加以佐证的方式分析缝洞体的地震特征及其相互连通性,分析结果的可靠性受到地震资料品质、地震解释员、研究方法等方面的影响,无法确保分析结果的准确性。

本文通过对理论模型的建立与处理相结合的方法,采用合适的处理流程与参数设定,为准确的地震地质解释提供保障,因此,地震模型正演与数据处理方法的有机结合,可为缝洞连通性分析发挥非常重要的作用。

1 思路与对策

采用地球物理数字模拟的方法,建立一批相对简单的缝洞体地质模型,通过波动方程方法模拟地震波在地质体中传播,并获取地震记录。然后应用GeoEast处理解释平台,采用叠后、叠前时间偏移等手段,获得理论模型下的地震波场。最后,通过解释地震振幅等信息,分析地震波场中反映真实地质模型的有效成分,认识不同缝洞体系地震波场特征的差异,进行指导缝洞连通性的解释。

2 关键技术与效果

2.1 波动方程正演分析技术

在地球物理资料解释过程中,常常利用正演模拟结果与实际地球物理勘探资料进行比较,不断修正模型,使模拟结果与实际资料尽可能地接近,进而使解释结果更接近客观实际。地球物理正演是对地质模型进行理论模拟,分物理模拟和数值模拟两种。其中数值模拟是基于弹性介质波场传播理论的计算机环境下模拟实际地质模型的方法,对解释实际地震资料、表征地下介质结构与岩性有重要的实际

意义。

数学模拟方法求解地球物理正演的关键因素有以下几个部分:实际地质条件(岩性、油气流体物性)、实际地震条件(激发主频、观测系统)。一般步骤是:第一步建立合理的地质模型和数学模拟,可根据研究对象和问题建立,依据地质剖面、地震数据、测井数据,模型需要能够反映主要地质构造和岩石、矿物特征,具有代表性或普遍性、针对性和特殊性;第二步是设置合理的地震采集观测系统,应与实际地震采集地震数据的观测系统一致或相近;第三步是模拟计算,选择合理的计算方法,进行数值计算。

研究中,假设只考虑缝洞体之间的连通性,根据实际井钻探到不同介质的速度充填到正演地质模型中,设置洞穴、裂缝两种地质体介质。图1为4种不同地质结构的缝洞体模型,图1a为4个相互独立的洞穴,图1b为4个洞穴间有少量裂缝连通的缝洞集合体,图1c为4个洞穴间有一定数量裂缝连通的缝洞集合体,图1d为4个洞穴间有大量裂缝连通的缝洞集合体,洞穴内充填速度4 800 m/s,裂缝内充填速度4 000 m/s,其中洞穴之间相距约50 m,单炮激发子波为30 Hz雷克子波,观测系统为中间激发,双边接收。4个模型对应的叠前偏移处理结果(如图2所示)表明,在目的层表现出明显的波形差异,随着洞穴之间裂缝的增多,地震剖面表现为同相轴连续性变好的特征越明显。

模拟地震波场时,对相同激发炮数,不同检波点数的两种观测系统下的结果对缝洞连通性分析的影响进行对比分析。

图3为非连通缝洞体模型的不同观测系统下模拟结果的偏移剖面对比图,图3a对应观测系统见表1A。图3b对应观测系统见表1B,图3a和图3b的偏移地震剖面特征有明显差异,小检波距、小面元正演资料对缝洞体特征的刻画更精细。

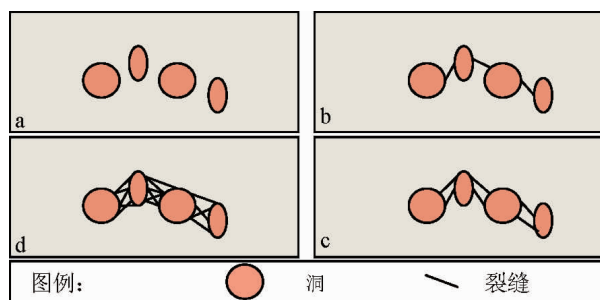


图1 4种不同地质结构的缝洞体模型

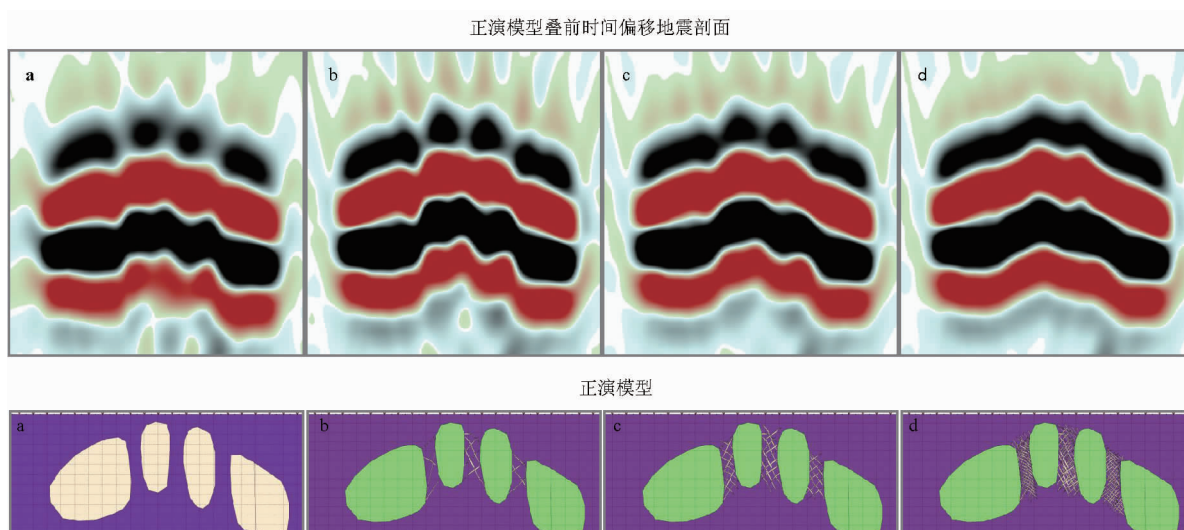


图2 4种不同地质结构的缝洞体模型对应的地震剖面

2.2 缝洞型碳酸盐岩处理技术

叠前时间偏移是复杂构造准确成像最有效的方法之一,其能适应纵向横向速度变化较大的情况,可适用于大倾角区域的构造偏移成像。影响偏移成像效果的主要因素是偏移孔径和偏移速度。偏移孔径是综合考虑第一菲涅耳带半径、某个角度范围内绕射能量归位所需要的距离和使倾斜层归位所需要的偏移距离的偏移参数,偏移孔径设置过小,偏移剖面将损失陡倾角的同相轴;偏移孔径设置过大,会降低偏移资料的成像质量。在实际使用中,应根据倾角来确定孔径。叠前偏移对偏移速度较敏感,较小的速度误差都可能影响偏移成像效果,在实际使用中通过迭代确定最佳偏移速度。叠前时间偏移方法主要分为两类,即用于准确构造成像的叠前时间偏移和振幅保持叠前时间偏移,每一类方法都有两种实现方式:Kirchhoff型和波动方程型。由于建立的理论模型构造相对简单,着重强调资料的保幅性,因此应用振幅保持叠前时间偏移技术对炮集数据进行处理。

Kirchhoff叠前时间偏移方法一般在共炮点道集上进行,对二维和三维叠前偏移做法是一致的。该方法是将共炮点记录从接收点上向地下外推(此过程实际上是一个估算偏移孔径的反过程),计算从炮点到地下反射点的地震波入射射线的走时,并将所有的深度点上的延拓波场都计算成像值,组成偏移剖面,最后将所有的炮道集记录按地面点相重合的记录相叠加的原则进行叠加,即完成叠前时间偏移处理。

之所以选择叠前时间偏移处理技术进行针对性处理,是因为相比叠后时间偏移处理技术,前者对缝

洞体连通性分析更为有利。图4为非连通模型及其叠后/前时间偏移处理地震剖面,图4b和图4c均为非连通模型的叠后时间偏移和叠前时间偏移处理局部地震剖面,显然叠前时间偏移处理资料比叠后时间偏移资料对洞穴之间的振幅差异刻画更清楚。

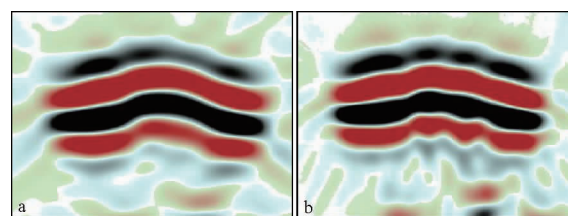


图3 非连通缝洞体模型的不同观测系统下模拟结果的偏移剖面对比

表1 图1a非连通缝洞体模型的不同观测系统对比

观测系统	炮间距 /m	检波距 /m	最大最小 炮检距/m	满覆盖 次数/次	面元 /(m·m)
A	50	50	25.0	120	25.0
B	50	25	12.5	120	12.5

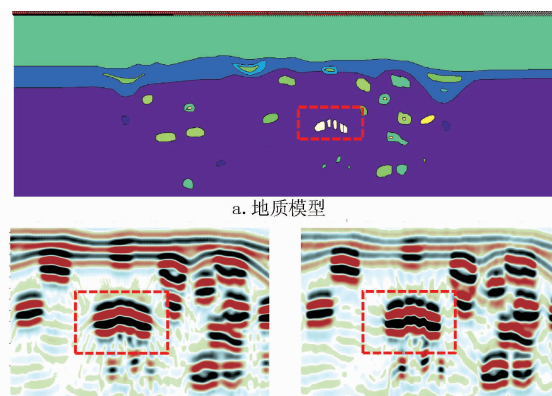


图4 非连通模型及其叠后/前时间偏移处理地震剖面

在常规叠前时间偏移处理过程中,偏移孔径和偏移速度对地层偏移归位的影响较大。研究中,对不同偏移孔径进行测试。图 5 为非连通模型的不同偏移孔径下叠前时间偏移处理地震剖面对比,在偏移速度相同的基础上,取大、中、小 3 种不同偏移孔径进行叠前时间偏移处理,图 5 中 3 个处理结果的差异并不明显。当前,由于塔里木盆地的地震资料品质整体偏

差,解释性处理技术^[10]得到广泛的应用,一种是基于叠后频谱分析的滤波方法,一种是基于地层倾角扫描的滤波方法,一种是基于子波分解与重构的方法,一种是基于叠前 CRP 道集分析的方法。以叠前 CRP 道集分析为例,取全偏移距、去近偏移距和去远偏移距 3 种方案,分别叠加(图 6),结果表明,去远偏移距的结果对缝洞体的刻画最为清楚。

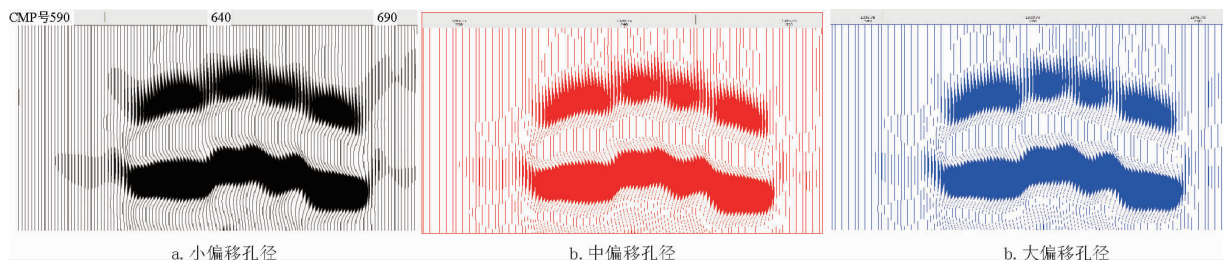


图 5 非连通模型不同偏移孔径 PSTM 处理地震剖面对比

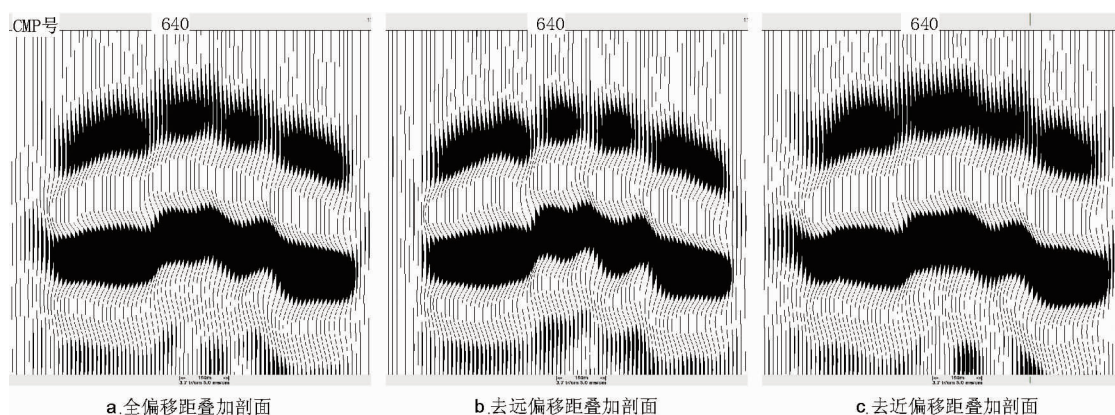


图 6 非连通模型不同偏移距叠加地震剖面对比

2.3 地震瞬时振幅解释技术

反射地震记录的振幅可看作有限带宽的反射系数^[9-10],地震振幅的大小取决于反射系数的大小和反射系数的组合。缝洞型储层与围岩有明显的波阻抗界面,反射系数大。由于地震波传播的特点,纵横向的大反射系数容易识别,但横向相距很近的反射系数组合不容易识别,只有将局部差异等比例放大才能更好识别,为此提出地震瞬时振幅解释技术,即提取目标区的瞬时振幅值,进行归一化处理,采用按空间位置排列的方式进行分析。如图 7 所示,该图如图 5 中 3 种不同偏移孔径时叠前时间偏移处理地震剖面不同 CMP 道号的第一个波峰同相轴的瞬时振幅对比图(纵轴为归一化处理的振幅值、横轴为地质模型的检波点 CMP 道号)。相比之下,较大的偏移孔径下处理结果对缝洞体刻画更为有利,其振幅差异更易识别。

通过此方法,可实现基于地震资料静态分析的缝洞体系连通性半定量解释。如表 2 所示,为 5 种

不同内部结构的缝洞体模型,各缝洞体之间相距 800 m,缝洞体之间通过充填不同速度来表征裂缝的强度,总共有 11 种模型。速度值的充填均采用引文《岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究》^[11]中对砂岩与孔隙度的拟合公式。设定 800 m 范围内缝洞体之间裂缝充填速度与围岩充填速度差 50 m/s 以下,视为缝洞体之间不连通;反之则相互连通,但连通程度有所差别。

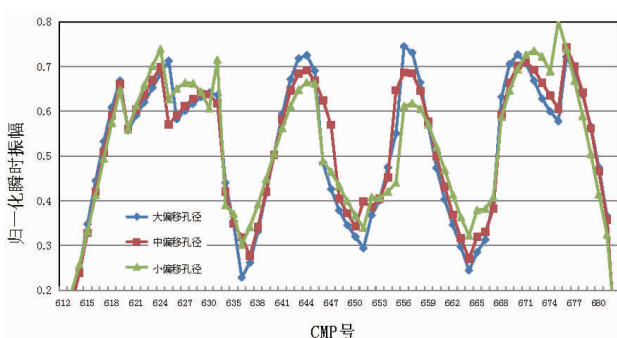


图 7 非连通模型不同偏移孔径数据瞬时振幅解释结果对比

表2 11种不同结构缝洞模型间充填速度对比

序号	模型	裂缝充填速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	备注
1	M1	6 000	不连通, 充填速度与围岩相同
2	M2	5 990	不连通
3	M3	5 980	不连通
4	M4	5 970	不连通
5	M5	5 960	不连通
6	M6	5 950	不连通
7	M7	5 920	连通
8	M8	5 890	连通
9	M9	5 740	连通
10	M11	5 600	连通
11	M12	5 400	连通

图8为表2所示11个地质模型正演数据的叠前时间偏移处理结果瞬时振幅解释结果对比图,以速度差大于50 m/s的M6模型为分界点,视振幅波动幅度大于等于图8a中红线处值(即取瞬时振幅解释结果归一化后数值1.0。其中,纵轴为地质模型的检波点归一化处理的振幅值,横轴为地质模型的检波点CMP道号)。因此,模型M7-M12等5个模型是连通的。对于实际地震数据,根据测井资料可估算得裂缝与溶洞的速度差,结合井震标定结果,对地震瞬时振幅解释结果进行评级,视振幅波动幅度大于等于瞬时振幅解释结果归一化后数值的等级为有效连通的缝洞体系,以此实现井网定量解释外推。

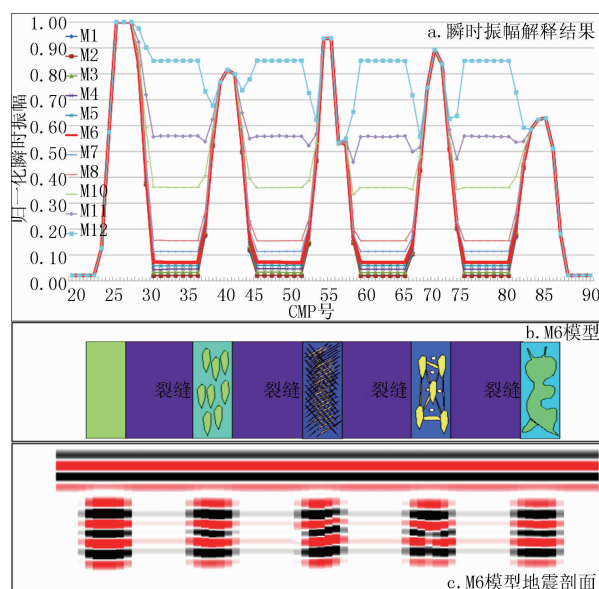


图8 11种不同地质结构缝洞模型瞬时振幅解释结果对比与连通性半定量解释

3 应用实例

塔北哈拉哈塘油田奥陶系缝洞型储层是原油生产的主要战场,大型缝洞集合体的高效开发是研究中最重要内容之一。W1井区奥陶系一间房组缝洞型储层非常发育,实际地震剖面特征表现为强“串珠”状反射(图9)。如果图9中W1井位置下部大型缝洞集合体(虚框内)是连通的,将为W1井提供足够的能量,其生产特征应表现为明显的水驱特征。如果为相互独立的缝洞体,则不能为W1井提供足够能量,则W1井应表现为弹性驱特征。研究区内W2井与W2-1井为实际钻井揭示的同一套连通型缝洞体系的两口井,静态研究W2井与W2-1井两井为连通型井组,周边裂缝相对发育。动态资料表明,W2井投产一年时间内油压压降很小,而W2-1井试油敞放求产时,W2井油压突降,生产受到明显干扰。其波谷瞬时振幅解释结果如图10所示,归一化后各值均在0.4以上,相比基于同一资料波谷瞬时振幅解释结果的W1井,缝洞主体的解释波谷瞬时振幅解释结果均大于0.6,仅有小范围值的波动,初步分析认为,W1井揭示的“串珠”状储层与处下部“串珠”状储层分属两个相对独立的缝洞体。

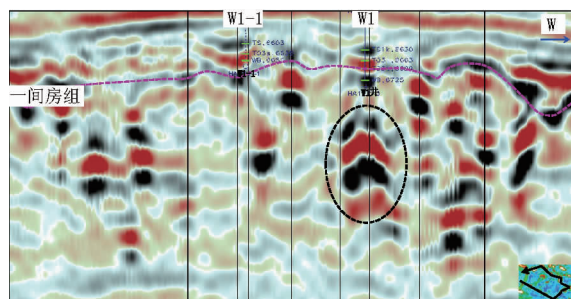


图9 塔北哈拉哈塘油田W1井区一连井地震剖面

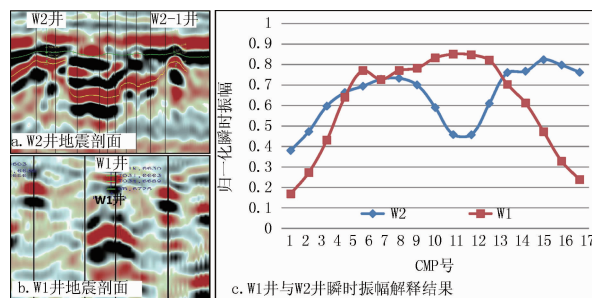


图10 塔北哈拉哈塘油田W1井处下部大型缝洞集合体与W2井连通缝洞体系波谷瞬时振幅解释结果对比

4 结论与认识

通过基于地震模型正演与数据处理缝洞连通

性分析的一点思考与实践,取得结论:

(1)小检波距、小面元正演资料对缝洞体特征的刻画更精细,因此,地震数据采集时,较大的道密度对碳酸盐岩缝洞连通性静态分析更为有利;

(2)地震资料处理是应用波形特征分析缝洞连通性的关键,对解释结果有直接影响,不同处理参数对波形特征有影响,因此,针对不同解释目的应该有针对性的处理参数及技术措施;

(3)地震瞬时振幅解释技术可以在一定程度上区分缝洞体之间地震波场差异,在井震精细标定的基础上可指导缝洞连通性静态半定量解释。

参考文献:

- [1] 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. 石油实验地质, 2007, 29(5): 217-220.
- [2] 雷川, 陈红汉, 苏奥, 等. 塔河地区奥陶系深埋岩溶洞穴特征及保存机制初探[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(2): 27-31.
- [3] 杜金虎, 杨平. 碳酸盐岩岩溶储层描述关键技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [4] 杨鹏飞, 张丽娟, 郑多明, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩大

型缝洞集合体定量描述[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6): 89-94.

- [5] JOHN, SNEDDEN W, PETER, et al. 储层连通性: 定义、实例与对策[J]. 国外油气动态, 2008(9): 22-38.
- [6] 杜宗群, 姜萍. 利用储层连通性评价剩余油分布[J]. 国外测井技术, 2005, 20(1): 25-27.
- [7] 但光箭. 井震结合轮古碳酸盐岩缝洞储层量化描述研究[D]. 华东: 中国石油大学, 2012: 33-37.
- [8] 刘运宏, 刘永雷, 吕东, 等. 缝洞体量化技术在塔中碳酸盐岩油气储量研究中的应用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(03): 84-86.
- [9] 刘振东, 张玺科, 许杰, 等. 基于褶积模型的地震振幅含义讨论[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(02): 208-210.
- [10] ZENG Xiangzhou, LIU Yonglei, HE Xiaosong, et al. Prediction of carbonate fracture treatment based on the explanation of the low SNR region[C]//Beijing 2014 International Geophysical Conference & Exposition, 2014: 965-968.
- [11] 史譔, 杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 379-384.

(编辑 杨芝文)

(上接第11页)

6 结论

(1)海安凹陷新街次凹发育泰二段、阜二段两套优质烃源岩,泰二段底部六尖峰段烃源品质最好,整个新街次凹均已成熟;阜二段中下部烃源岩有机质丰度较好,但演化程度相对较低,成熟烃源岩主要围绕新街次凹北部新街断裂带下降盘深凹中心分布,成熟烃源岩分布范围有限。

(2) K_2t_1 识别出三类沉积亚相和五类沉积微相类型,主要发育分流河道砂体; E_1f_3 发育三角洲前缘亚相前端沉积,主要砂体类型为河口坝; E_2s_1 为典型的河道砂体沉积。

(3)研究区可形成三套生储盖组合,即 K_2t_2 泥岩(生) - K_2t_1 砂岩(储) - K_2t_2 泥岩(盖)组合; E_1f_2 泥岩(生) - E_1f_3 砂岩(储) - E_1f_{4+3} 泥岩(盖)组合; E_1f_2 泥岩(生) - E_2s_1 底块砂岩(储) - E_2s_1 下部泥岩(盖)组合,其中泰州组生储盖组合为最有利勘探层系。

(4)新街断层是由两条边界大断层组成,具有

左行右阶雁列展布、分段发育的特点,具备形成构造转换带的条件,形成的断块圈闭主要位于两条断层下降盘首尾相接的位置,断层上升盘弧形部位也形成了一系列断鼻圈闭,受新街断层控制形成两种油气运移模式。

参考文献:

- [1] 刘平兰. 苏北海安凹陷泰州组烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2009, 39(4): 289-393.
- [2] 钱诗友. 苏北盆地海安凹陷阜三段油气成藏控制因素分析[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(5): 88-94.
- [3] PEACOCK D C P, SAMDERSON D J. Strike-slip relay ramps[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(10): 1351-1360.
- [4] 杨勉, 付广, 张云峰, 等. 构造变换带沉积充填特征与油气分布规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 15-17.
- [5] 朱秀香, 吕修祥, 王德英, 等. 渤海海域黄河口凹陷走滑转换带对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 476-482.
- [6] 邓津辉, 徐长贵, 周心怀, 等. 走滑断层转换带砂体发育特征与油气富集规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29(5): 18-23.

(编辑 杨芝文)