

碳酸盐岩洞穴型储层地震综合预测

——以塔里木盆地古城低凸起三维区为例

李毓丰¹, 顾乔元¹, 徐彦龙¹, 钱玲¹, 李新生¹, 余和中²
吴建国¹, 席勤¹, 徐永丽¹

(1 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院; 2 中国石油杭州地质研究院)

摘要 塔里木盆地古城低凸起三维地震工区内的奥陶系碳酸盐岩埋藏深,非均质性强,且无钻井资料。重点对奥陶系鹰山组三段—四段白云岩的串珠状地震反射体进行地质诠释。采用均方根振幅属性预测了储层平面分布规律,应用缝洞雕刻技术预测了裂缝和串珠体发育区,运用相干、曲率属性预测了断裂、裂缝的分布,联合应用频率衰减梯度、低频能量、平均频率和吸收系数等手段进行了油气检测。通过对多种信息的综合分析,评价优选出有利勘探目标。基于上述工作部署的A井,在鹰山组三段灰质白云岩储层中获天然气勘探重大突破,证实了地震综合预测方法的有效性。

关键词 古城低凸起; 鹰山组; 碳酸盐岩储层; 地震资料解释; 储层预测

中图分类号: TE122.2⁺4

文献标识码: A

塔里木盆地是一个由震旦纪—古生代的海相克拉通盆地与中—新生代的陆相前陆—陆内拗陷盆地组成的大型叠合盆地^[1],它在寒武系—下奥陶统沉积期间呈“西台东盆”的沉积格局,古城坡折带以西发育大型的碳酸盐岩台地,多期海平面升降的变化为多期碳酸盐岩岩溶的发育奠定了基础,坡折带以东则发育优质的盆地相烃源岩,为大型碳酸盐岩油气藏的形成创造了条件。塔里木盆地的碳酸盐岩中已经发现了多个油气田,取得了一系列重大的勘探成果,而古城低凸起的碳酸盐岩储层由于埋藏深、非均质性强、二维地震资料少且品质较差,储层识别和预测的难度大、可信度低,导致了古城低凸起的碳酸盐岩迟迟未能取得油气勘探的突破。2009年在该区无工业油气流井的情况下,首次实施满覆盖面积170.2 km²的三维地震,极大地提升了碳酸盐岩内幕成像资料的品质,为碳酸盐岩储层预测提供了重要保障^[2],也为A井油气突破奠定了基础。

1 地质背景

古城低凸起位于塔里木盆地北部拗陷的中南

部,面积约2.4×10⁴ km²。西以塔中I号断裂为界与中央隆起相接,东南以上寒武统—中下奥陶统台地边缘相带与塔东隆起相连,北界则向北部拗陷过渡衔接。古城三维地震工区位于古城低凸起的东南部、古城坡折带的西缘(图1),三维地震施工前工区内无钻井。前人研究表明,古城低凸起在奥陶系沉积期为碳酸盐岩台地相区,可能广泛发育层间岩溶储层^[2]。加里东中期(即中奥陶世末)的拉张环境下产生了大规模的北东东向正断裂,加里东晚期—海西早期(即志留纪—泥盆纪)的挤压环境下形成了北北东向走滑断层和北东向逆冲断层,这两期构造变形对古城低凸起区内的局部构造和碳酸盐岩岩溶储层都有进一步的改造作用。据邻区的X井和Y井钻遇的奥陶系鹰山组岩心分析结果,明确了碳酸盐岩储层以洞穴型、孔洞型为主,裂缝型为辅。上奥陶统却却克组—吐木休克组广泛沉积了一套由巨厚的黑色泥岩和泥质灰岩构成的区域盖层,它与下伏的中下奥陶统鹰山组孔洞、洞穴型白云岩储层形成了良好的储盖组合。在奥陶纪末期,下奥陶统—寒武系的斜坡—盆地相优质烃源岩进入排烃期,由断裂、岩溶缝洞和

收稿日期: 2014-06-12; 改回日期: 2014-08-01

本文受中国石油天然气股份有限公司项目“塔里木油田矿权区块评价”项目(编号:041013100134)资助

李毓丰: 1965年生,高级工程师。1989年毕业于江汉石油学院勘查地球物理专业。长期从事本专业的研究工作。通讯地址: 841000 新疆库尔勒市123信箱 勘探开发研究院规划中心; E-mail: liyuf_tlm@petrochina.com.cn

不整合面构成的输导体系,有利于油气在奥陶系鹰山组岩溶储层中聚集并形成原生油气藏。泥盆纪之后,该区一直处于原油裂解阶段,也有可能形成原油裂解气藏或凝析气藏。

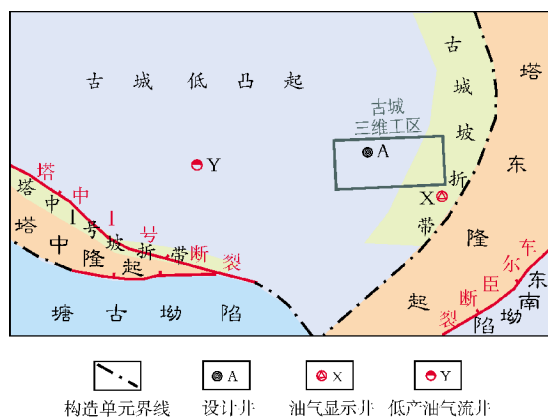


图1 塔里木盆地古城三维工区位置图

2 储层地震响应特征

由于碳酸盐岩的岩性单一且较致密,造成地震波的传播速度高、地震资料的分辨率低。Rafavich等人^[3]通过研究具有不同沉积特点、不同孔隙度和岩性以及不同组分、饱含水或饱含气的碳酸盐岩以后发现,孔隙度和密度是影响地震波传播速度的两大因素。孔隙度越大、密度越小,传播速度就越低,与优质储层的相关度就越高。在地震剖面上出现两个或两个以上很短、低频的强波峰,且波谷上下对应、相间分布时,即为“串珠”反射。当碳酸盐岩储层中溶洞发育时,就会导致地震波传播速度明显下降和频率明显衰减,剖面上就可能形成断续强反射或串珠反射,而且溶洞的大小、形状及充填介质会直接影响剖面上串珠的反射特征。在可分辨的范围内,溶洞宽度越小,串珠能量就越弱;溶洞宽度越大,串珠能量就越强。串珠反射可能是单个溶洞或多个溶洞的综合地震响应,而当地层中的上下发育多个相距较近的溶洞时,可能会在地震剖面中形成多个串珠反射^[4-5]。据此地震响应特征,对古城三维地震资料进行了精细解释,发现工区主要发育两套岩溶储层,呈准层状非均匀分布(图2)。第一套主要发育在下奥陶统鹰山组的顶部,表现为片状强反射特征(T_{O_2y} 反射界面,即一间房组底界附近,黄色波谷),储层类型可能为孔洞型和裂缝型;第二套主要发育在下奥陶统鹰山

组的中下部(T_{O_1y} 反射界面,即鹰山组底界附近),呈串珠状强反射,一般表现为“两峰夹一谷”的洞穴型储层反射标志。

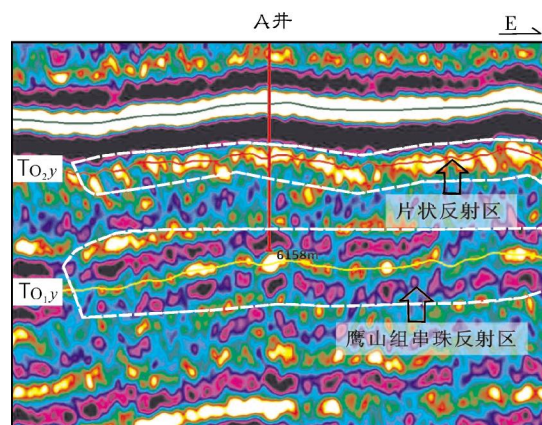


图2 塔里木盆地古城三维工区奥陶系鹰山组片状、串珠状反射剖面特征

T_{O_2y} 中奥陶统一间房组底界反射面; T_{O_1y} 下奥陶统鹰山组底界反射面

3 储层地震综合预测技术

高品质三维地震资料是进行碳酸盐岩储层预测的基础。本次研究首先对古城三维满覆盖区的鹰山组底界上下50 ms时窗进行缝洞雕刻,尽可能清楚地显示每个串珠体,经过剖面反复观察、寻找和筛选,确定典型的串珠反射;然后应用均方根振幅属性预测岩溶储层的平面展布趋势,应用相干和曲率属性预测断裂和裂缝的发育区,应用频率衰减梯度、低频能量、平均频率和吸收系数等属性进行油气检测,最后综合分析上述多种信息,提出有利勘探目标。

3.1 缝洞雕刻技术

该技术是用地震反射强度数据体来表征缝洞体,再应用本征值相干数据体来表征裂缝集合体,最后通过Landmark GeoProbe模块,实现缝洞体与裂缝体的融合。通过研究发现,古城三维区鹰山组顶部串珠反射不太发育,而鹰山组下部则较发育。根据三维区鹰山组缝洞雕刻的结果,结合地震剖面反射特征,共找到43个串珠反射,初步筛选出1、2、3、4、5号五个串珠,从中优选出2、3、4号三个典型串珠(图3)。并对2号串珠进行了缝洞雕刻,经计算,该串珠溶洞体积为 $2.14 \times 10^6 \text{ m}^3$,裂缝体积为 $2.37 \times 10^6 \text{ m}^3$ (图4)。

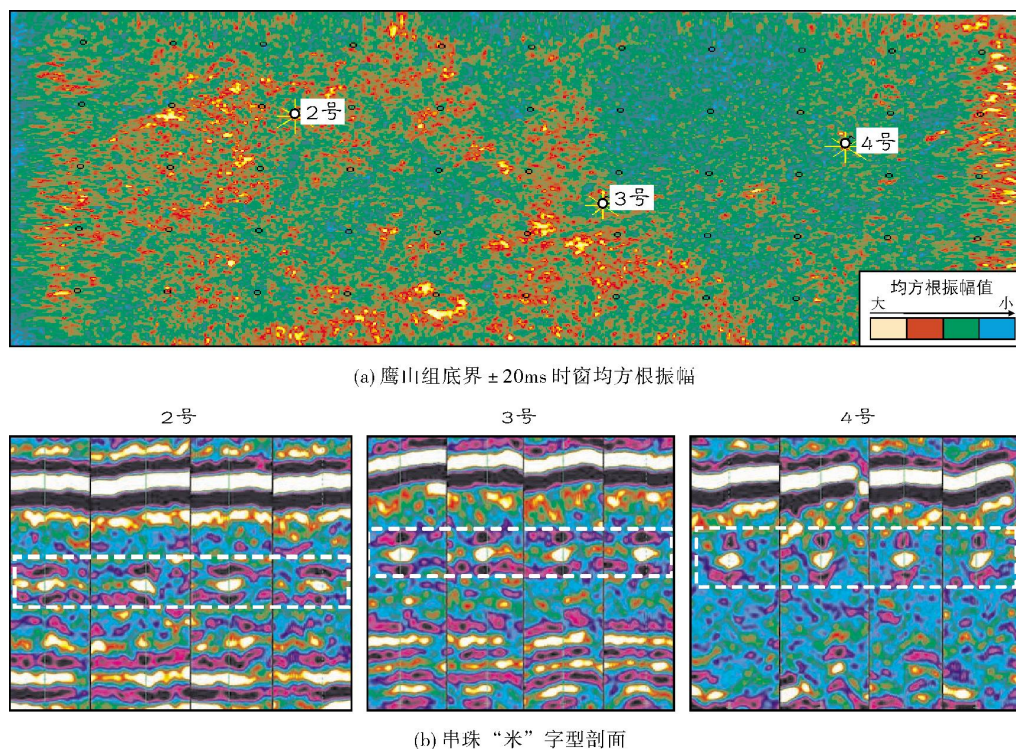


图3 塔里木盆地古城三维工区典型串珠状反射(2、3、4号串珠)的“米”字型地震剖面及平面分布

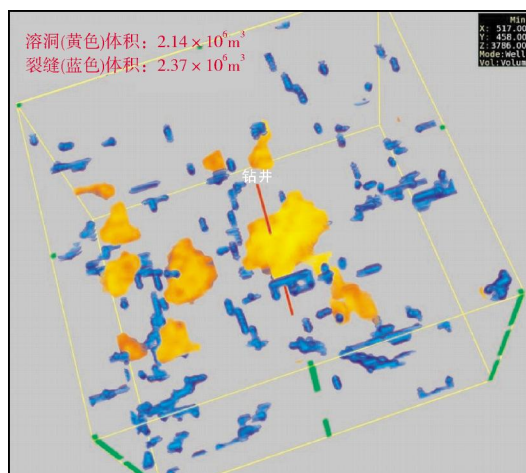


图4 塔里木盆地古城三维工区2号典型串珠状反射的缝洞雕刻立体图

3.2 地震属性技术

地震属性是由叠前或叠后地震数据,经过数学变换得到的地震波几何学、运动学、动力学或统计学特征。它是地震数据中反映不同地质特征的分量和子集,是刻画、描述地层结构、岩性及物性等地质信息的地震特征量。在古城三维区的碳酸盐岩储层预测和裂缝预

测中应用了均方根振幅、曲率和相干三种地震属性。

3.2.1 均方根振幅

振幅是地震资料中最重要的信息之一,振幅的强弱受地层岩性、物性及所含流体的影响,而均方根振幅最能表现碳酸盐岩岩溶缝洞的地质特征和横向变化^[6]。均方根振幅是对时窗内所有样点振幅平方和再取平均值后的算术平方根。它对绝对值大的地震波振幅反应敏感,突出了波阻抗差值大或反射系数绝对值大的区域^[7]。一般情况下,当地震剖面上的同相轴表现为连续强反射特征、且处于均方根强振幅区时,可能代表了碳酸盐岩储层不太发育;当地震剖面上表现为断续强反射或串珠状反射特征、并处于均方根振幅较强或强振幅区时,则可能代表了碳酸盐岩储层较发育;而当地震剖面的振幅强弱骤然变化得越大、越频繁时,碳酸盐岩储层就可能越发育。

在古城三维工区的地震剖面上,一间房组底界表现为一波谷和中、强断续片状反射特征。针对鹰山组表生岩溶储层,均方根振幅提取采用一间房组底界以上20 ms、以下60 ms之间的时窗(图5a),能够较好地反映鹰山组表生岩溶横向的变化情况,其有利分布面积约109 km²。1号、2号、3号、4号和5号串珠

位于均方根强振幅区内。而鹰山组底界表现为一波谷和中弱振幅断续反射特征,串珠较发育,均方根振幅提取选择鹰山组底界之上下50 ms时窗(图5b),可

以把串珠反射信息包括其中,能够较好地反映鹰山组深部岩溶发育情况,其有利缝洞面积为169.3 km²。1号、2号、3号及5号串珠位于均方根强振幅区内。

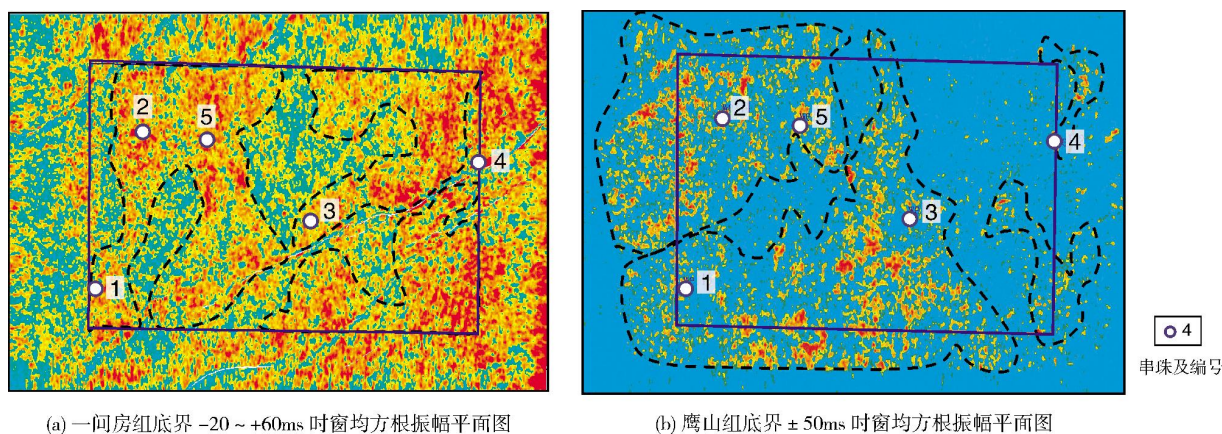


图5 塔里木盆地古城三维区下奥陶统鹰山组不同时间窗的均方根振幅平面分布图

3.2.2 曲率

曲率是描述曲线上任一点的弯曲程度,曲率越大则表示越弯曲。因此,曲率对构造形变引起的地层弯曲非常敏感,而碳酸盐岩的非塑性弯曲又与裂缝发育状况高度相关,根据曲率属性可以刻画微小挠曲、裂缝和褶皱,能够识别落差小于1/4波长的微小断裂^[8-10]。

在提取三维数据体曲率属性时,先计算倾角、方位角属性体,得到每个样点的倾角值,再和邻近样点的倾角和方位角进行比较,计算出曲率值,从而获得整个三维体的曲率属性。在本次研究中应用最大正曲率属性预测裂缝发育区^[11]。从鹰山组顶面以下40 ms时窗提取的最大正曲率属性平面图(图6)上看出,断裂、裂缝带为曲率值大的蓝色区域。作为勘探重点的中部地垒区,裂缝主要发育在南北向走滑断裂的周围,分析认为其形成于加里东晚期—海西早期的挤压环境。

3.2.3 相干

相干属性提取技术主要用于描述地震数据的空间连续性,它是通过计算相邻地震道的相干性,从而突出不相干的地质现象。凡是导致地层岩性、速度变化的诸因素,均是造成相邻地震道不相干的原因。从1995年相干技术引入到三维地震解释开始,相干算法已从第一、第二代发展到了第三代。第三代相干算法将矩阵引入到相干计算中,利用矩阵特征结构

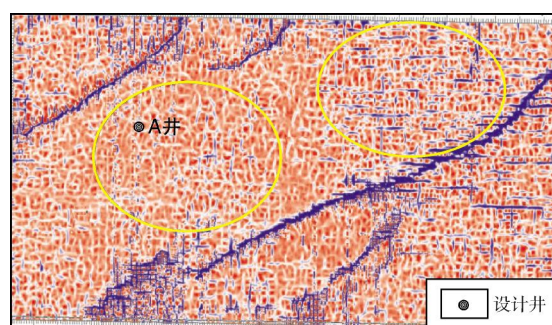


图6 塔里木盆地古城三维区鹰山组顶面以下40ms时窗的最大正曲率平面图

来计算相似性,能有效压制噪音、识别断层和河道边界,横向分辨率也较高。基于该算法的相干技术即为本征值相干技术^[12-14]。

古城三维区断裂的识别采用本征值相干技术,选择奥陶系一间房组顶界上下20 ms时窗,采用自适应算法及本征值算法相结合来提取相干属性。从其平面图上看(图7),各期断裂得到了比较精细的刻画:每条断裂都是一个破碎带,与地质规律相吻合;断距较大的正断裂和逆冲断裂分布明显,断距较小的走滑断裂能够识别,如Line458剖面上的F₁、F₄正断裂及F₁₁—F₁₅走滑断裂,更小级别的扰动可能是小断层或裂缝发育区的反映。这与图6最大正曲率平面图相比较,本征值相干刻画的断裂更加细腻、可靠。

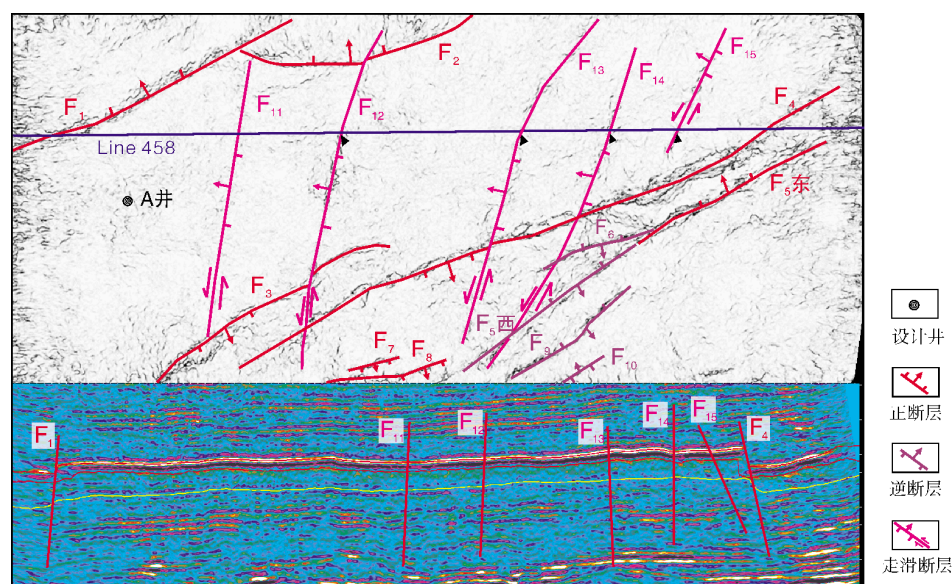


图7 塔里木盆地古城三维区奥陶系一间房组顶界±20ms时窗相干平面分布图

3.3 油气(储层)检测技术

碳酸盐岩储层的吸收性质与孔隙、含油气情况关系密切,本次研究主要通过提取频率衰减梯度、低频能量、平均频率和吸收系数等属性进行储层或油气检测。

3.3.1 频率衰减梯度

地震波在向地下传播过程中,高频成分衰减较快,而且地震波的衰减和频率成正比^[15-16],当地层发育优质储层或储层中富含油气介质时,地层的吸收作用就越强,频率衰减梯度就越大,因此,通过提取频率衰

减梯度属性可以反映有利储层发育区或可能的油气分布范围。在古城三维区针对鹰山组表层岩溶和深部岩溶储层,分别选取鹰山组顶界以下30ms时窗和鹰山组底界上下50ms时窗提取频率衰减梯度属性平面分布图(图8),图中红色区域表示频率衰减梯度较大,预测为油气分布的有利区。在鹰山组顶界以下30ms的频率衰减梯度图上(图8a),1号和2号串珠附近的频率衰减梯度较大,认为是表生岩溶储层的有利勘探目标;在鹰山组底界上下50ms频率衰减梯度图上(图8b),1号、2号、3号和5号串珠周围的频率衰减梯度较大,认为是鹰山组下部洞穴型储层的有利勘探目标。

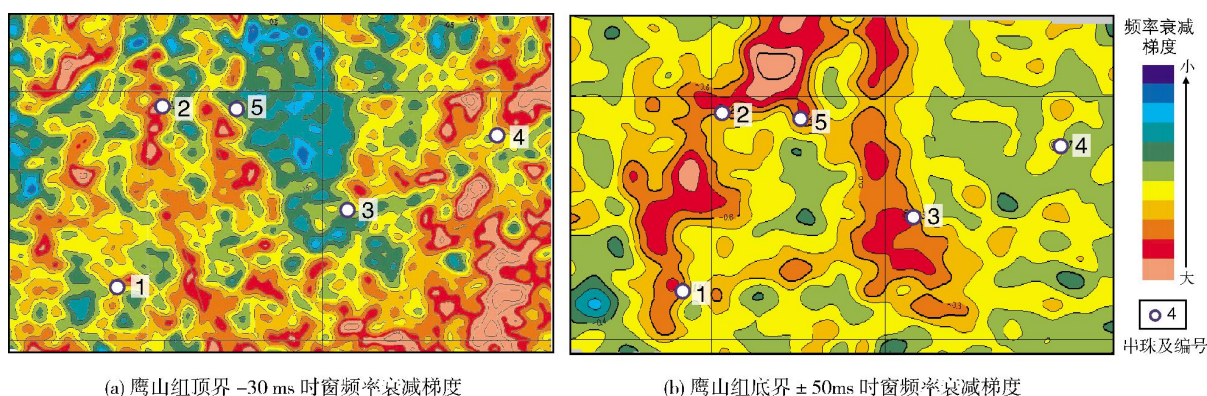


图8 塔里木盆地古城三维区奥陶系鹰山组频率衰减梯度平面分布图

3.3.2 低频能量、平均频率、吸收系数

基于叠后保幅纯波地震资料的低频能量、平均频率和吸收系数,是衡量储层是否发育、是否含有油

气的三个重要指标,当低频能量较大、平均频率较低、吸收系数较高这三个条件同时满足时,地层中含油气的可能性就较大^[17-18]。

低频能量 属于振幅属性。在地震剖面上,伴随频率变低的振幅若出现强弱突变,通常反映了储层发育或含油气。如碳酸盐岩串珠响应的低频振幅异常,多与储层发育或含油气相关。

平均频率 频率是反映油气的一个重要指标。如果储层孔隙中充填了流体或气体等低速介质,就会增大地层的衰减系数。当地震波通过含油气层后,地震波主频会明显降低。因此,根据平均频率的变化可以判断储层和油气是否存在。

吸收系数 由于地层的吸收作用,使得地震信号在向地下传播的过程中,高频成分要比低频成分衰减得更快。当储层含油气时,这种频率衰减现象更加明显,反映的灵敏度也比较高。因此,根据吸收衰减的异常变化可以检测储层或油气。

运用上述三项指标对 2 号、3 号、4 号串珠进行了检测(图 9),可以看出这三个串珠都满足储层发育或油气存在的特征,因此,推断这三个串珠发育区含有油气的可能性较大。

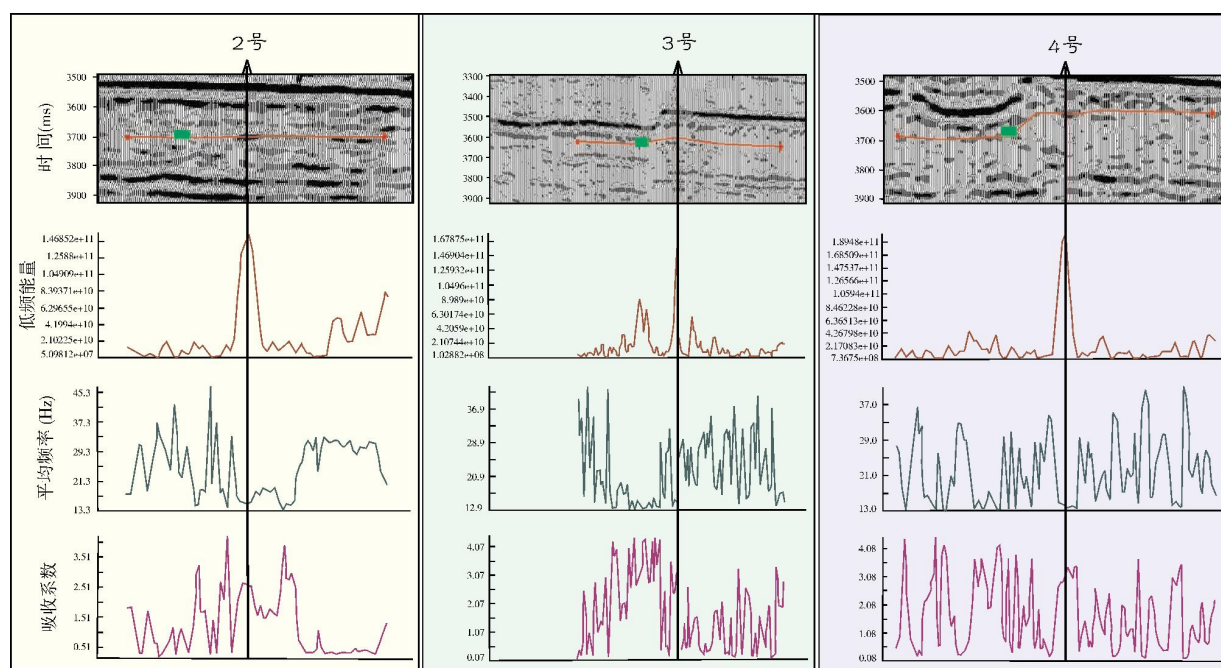


图 9 塔里木盆地古城三维区 2 号、3 号、4 号串珠低频能量、平均频率、吸收系数指标图

4 应用效果分析

本次研究针对古城三维区碳酸盐岩埋藏深、非均质性强、无钻井的特点,以典型串珠反射特征作为寻找鹰山组白云岩洞穴型储层的突破口,应用均方根振幅对碳酸盐岩储层进行平面趋势预测,通过三维相干体、曲率属性等信息的融合,搞清了断层、裂缝发育期次及其可能对岩溶储层的改造作用。根据串珠反射特征,缝洞雕刻、油气检测、构造和断裂因素,优选出 2 号、3 号、4 号三个串珠为有利的油气勘探目标。据此在 2 号、3 号串珠上相继部署了钻井,都获得了高产工业气流。

其中, A 井是在 2011 年古城三维区部署的首口探井,也是塔里木油田公司的重点风险探井,该井于 2012 年 5 月 20 日用 8 mm 油嘴对奥陶系鹰山

组 6 144~6 169 m 井段进行完井测试,获日产天然气 26.7 万方的高产气流,这是在古城低凸起首次取得的重大发现。该井出气段为奥陶系鹰山组三段白云岩,岩心薄片分析表明该区准同生期层间岩溶发育,并且叠加了热液作用,改善了储集性能,主要储集空间为粒间孔、晶间孔和针尖状溶蚀孔,见微裂缝、缝合线。成像测井上也反映了相对均质的小型溶蚀孔洞特征,在井深 6 160 m 处可见渗流粉砂充填在溶洞之中。该井钻至井深 6 162 m 发生井漏,漏失钻井液约 14.8 m³,因发现油气流而提前完钻。经层位标定,井底位于“两峰夹一谷”串珠反射的波谷顶部,上波峰被钻穿,表明该井已钻至洞穴型储集层中(图 2)。

另外, 2012 年针对 3 号串珠的钻井在鹰山组 6 070.2~6 080.9 m 井段(串珠反射段)测试获日产

47.8 万方高产工业气流; 针对位于鹰山组均方根强振幅区 5 号串珠的钻井, 也发现多层油气显示。这些一方面说明了研究区碳酸盐岩洞穴型储层的勘探潜力巨大, 另一方面也证实了碳酸盐岩储层预测在无井约束的情况下, 采用有针对性的预测方法和油气检测方法, 也一样能取得良好的勘探效果。

5 结 论

(1) 在碳酸盐岩地区, 地震剖面上的典型“串珠”反射位置代表了洞穴型储层发育区或油气的赋存场所, 具有普遍的适用性。通过三维地震数据的缝洞雕刻技术, 结合地震剖面反射特征, 可快速锁定典型串珠反射体。

(2) 由于影响地震储层预测、油气检测结果的因素众多, 多解性较强, 选取适合碳酸盐岩洞穴型储层的技术方法进行综合论证, 可以提高储层预测结果的正确性。本次研究中应用均方根振幅属性预测岩溶储层的平面展布趋势, 运用相干和曲率属性预测断裂和裂缝发育区, 采用频率衰减梯度、低频能量、平均频率和吸收系数等属性进行油气检测, 最后分析多种信息, 提出有利的勘探目标, 实践表明, 这种地震综合预测方法是有效的。

参 考 文 献

- [1] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 653-663.
- [2] 王招明, 杨海军, 齐英敏, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 1-9.
- [3] Rafavich F, Kendall C H, Todd T P. The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks[J]. Geophysics, 1984, 49(10): 1622-1636.
- [4] 王西文, 雍学善, 王宇超, 等. 面对重点勘探领域的地震技术研究和应用时效[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(3): 83-90.
- [5] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 385-391.
- [6] 万方, 崔文彬, 李士超. RMS 提取技术在溶洞型碳酸盐岩储层地质建模中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 279-286, 293.
- [7] 杨春惠, 张伟, 高建波. 均方根振幅在乌伦古坳陷东部地区储层预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(29): 7493-7499.
- [8] 崔立杰, 何幼斌, 王锦喜, 等. 基于层面的地震曲率属性在碳酸盐岩断裂预测中的应用——以塔里木盆地塔北某区块为例[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 92-96.
- [9] 王世星. 高精度地震曲率体计算技术与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 965-972.
- [10] 王雷, 陈海清, 陈国文, 等. 应用曲率属性预测裂缝发育带及其产状[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 885-889.
- [11] 余和中, 钱玲, 韩守华, 等. 张裂型褶皱下中和面顺层张裂区: 一类有利储层发育区——兼谈塔里木盆地碳酸盐岩溶蚀储层的发育特征[J]. 海相油气地质, 2013, 18(2): 51-55.
- [12] 余德平, 曹辉, 王成彬. 相干数据体及其在三维地震解释中的应用[J]. 石油物探, 1998, 37(4): 75-79.
- [13] 王振卿, 王宏斌, 龚洪林. 地震相干技术的发展及在碳酸盐岩裂缝型储层预测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 977-981.
- [14] 徐希坤, 王庆华. 本征值相干技术在青东地区的应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 265-267.
- [15] 杨璐, 贺振华, 文晓涛, 等. 频率衰减属性在深层碳酸盐岩油气勘探中的应用[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 98-101.
- [16] 张景业, 贺振华, 黄德济. 地震波频率衰减梯度在油气预测中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(3): 207-211.
- [17] 龚洪林, 李闯, 王宏斌, 等. 应用 AVO 分析技术预测塔中岩溶储层含油气性[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(2): 1-3.
- [18] 王招明, 于红枫, 吉云刚, 等. 塔中地区海相碳酸盐岩特大型油气田发现的关键技术[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 218-223.

编辑: 黄革萍

Integrative Seismic Detection of Cavernous Carbonate Reservoir: Application at a 3-D Seismic Survey Area in Gucheng Low Uplift, Tarim Basin

Li Yufeng, Gu Qiaoyuan, Xu Yanlong, Qian Lin, Li Xinsheng,
Yu Hezhong, Wu Jianguo, Xi Qin, Xu Yongli

Abstract: A geological interpretation is done to the beads-shaped seismic reflectors shown in deep-buried Ordovician Yingshan-3 to -4 carbonate reservoirs with anisotropy, which are selected in a 3-D seismic survey target area in Gucheng Low Uplift. A series of seismic interpretation technology are used to predicting the rule of reservoir distribution in plane, the fault and fracture distribution zones, and the beads-shaped reflector zones, as well as detecting hydrocarbon. Based on these integrative predictions, some favorable drilling targets in the reservoirs are evaluated and elected in this seismic target area. The fact that commercial gas flow was obtained from the Well-A that was arranged to drill into the Yingshan-3 dolostone reservoir has proved effectiveness of this integrative seismic predictions.

Key words: Ordovician; Carbonate reservoir; Seismic data processing; Reservoir prediction; Tarim Basin

Li Yufeng: Senior Geophysics Engineer. Add: Tarim Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Co. Korla, Xinjiang, 841000, China