

川中HC地区龙王庙组优质白云岩储层地震预测

王培培, 吴闻静, 雷 扬, 陈明春, 罗章清, 谭代英

(中国石化石油工程地球物理有限公司南方分公司, 四川 成都 610041)

摘要:四川盆地川中地区龙王庙组发育台内高能颗粒滩相白云岩储层,具有一定的勘探潜力,基于HC地区三维地震资料及已钻井等地质资料,开展了相关的储层预测方法研究,主要包括:井震精细标定明确龙王庙组顶、底界地震反射特征;根据已钻井建立模拟储层纵向变化的地质模型,开展正演建立储层地震响应模式;优选对储层敏感的地震属性刻画优质储层的平面展布;多方法联合反演技术,定量刻画储层厚度。综合预测结果表明:HC地区龙王庙组储层纵向上主要分布在中、上部,厚度介于5~70 m;横向上滩体储层呈北东向展布,与磨溪主体展布方向一致,厚层滩体发育区内,存在多个分隔的颗粒滩体。研究结果认为工区A井以东地区是有利的储层发育区。

关键词:白云岩储层;储层预测;碳酸盐岩;龙王庙组;四川盆地

中图分类号:P631 **文献标志码:**A

Seismic prediction of high-quality dolomite reservoirs in Longwangmiao Formation in HC area of central Sichuan

WANG Peipei, WU Wenjing, LEI Yang, CHEN Mingchun, LUO Zhangqing, TAN Daiying

(South Branch of SINOPEC Geophysical Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: Intra-platform high-energy granular beach dolomite reservoirs are developed in the Longwangmiao Formation in the central Sichuan Basin, which have certain exploration potential. Based on 3D seismic data and geological data of drilled wells in the HC area, relevant reservoir prediction methods have been carried out. Firstly, the seismic reflection characteristics of the top and bottom boundary of the Longwangmiao Formation were defined by fine calibration between the wells and the seismic data. Secondly, a geologic model was built after an analysis of the existing data and forward modeling was carried out to establish a reservoir seismic response model. Thirdly, according to the selected sensitive seismic attributes, multi-parameters seismic attributes were adopted to describe the plane distribution of high-quality reservoirs. Finally, quantitative prediction of the reservoir was performed through the multi-method joint inversion technique, which can effectively describe the reservoir thickness. The comprehensive prediction results show that Longwangmiao reservoirs in the HC area are mainly distributed in the middle and upper parts of the longitudinal direction, with a thickness ranging from 5 m to 70 m. The lateral upper beach reservoirs are distributed northeastward, which is consistent with the main distribution direction of Moxi. There are multiple separated grain beaches in the thick beach development area. The east part of well A in the work area is a favorable reservoir development area.

Key words: dolomite reservoir; reservoir prediction; carbonate rock; Longwangmiao Formation; Sichuan Basin

1 概况

随着浅部油气资源的大量开采和资源量的减少,深层—超深层海相碳酸盐岩储集层成为未来油气勘探的重要领域和目标^[1]。高石梯构造的GS1井在寒武系龙王庙组发现气层、震旦系灯影组获日产百万立方米高产气流^[2]。MX8井龙王庙组测试获气 $190 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是四川盆地继GS1井震旦系获气之后天然气勘探的又一个重大突破^[3]。寒武系龙王

庙组气藏是目前我国发现的单体规模最大的海相碳酸盐岩整装气藏,该气藏的发现对满足我国迅猛增长的天然气需求具有重要的意义^[3]。而龙王庙组

收稿日期:2021-04-08;改回日期:2021-06-22。

第一作者简介:王培培(1988—),女,硕士,工程师,主要从事地震资料解释工作。E-mail:1521560046@qq.com。

基金项目:中国石化集团公司科研基金项目联合资助(JPE19016、JP20009)。

气藏的白云岩储层具有埋藏深(一般介于4 400~4 900 m)、储层薄和非均质性强的特点,储层预测难度大^[3]。针对这一技术难点,将正演、井震分析、多属性定性预测和波阻抗、孔隙度定量预测等多种技术方法有机结合起来,使储层预测结果更加准确,为勘探开发打下坚实的基础。

本文通过对已有的和最新的地质、钻井及测井等各项资料成果进行深入分析和研究,详细介绍川中HC地区龙王庙组优质白云岩滩相储层地震预测方法及应用效果。

2 储层地质、地震特征

2.1 地质特征

HC地区属川中古隆平缓构造区向川东南高陡构造区的过渡地带,毗邻高石梯-磨溪地区。龙王庙组建造于沧浪铺组碎屑岩陆棚或混积陆棚(缓坡)沉积的基础之上,受控于古地貌西高东低的格局^[4-5],总体表现西薄东厚的特征(图1),整体上为碳酸盐台地沉积^[6],龙王庙组与其上、下地层呈整合接触关系^[3]。已有的钻井资料表明,龙王庙组地层厚度横向分布相对比较稳定,介于70~110 m之间,但内部储层厚度差异大,从数米到50~70 m不等,主要发育在中上部,岩性主要为颗粒滩相沉积的砂

屑白云岩、鲕粒白云岩等^[7-10]。

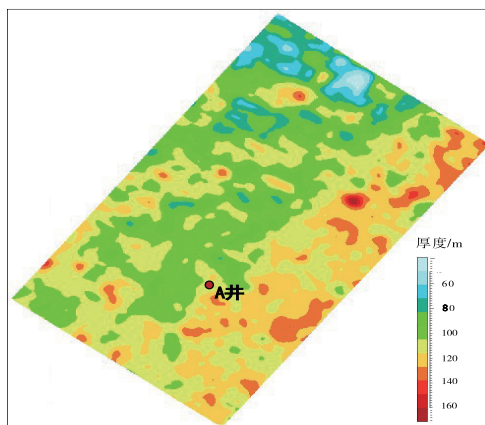


图1 HC地区龙王庙组沉积厚度

2.2 地震特征

2.2.1 井震精细标定

在区域层序地层格架和地层划分对比基础上,通过单井和联井反射层位标定,确定统一的解释层位。利用VSP资料、合成地震纪录进行井-震综合标定,建立地层与地震波的对应关系,确定地震反射波组的地质属性。从A井的井震标定可以看出,龙王庙组储层段主要分布在中、上部,储层顶底双波峰反射特征,储层整体发育在强波谷位置,相对于上下围岩,储层呈现低密度、高声波时差的特征,储层整体低阻抗(图2)。

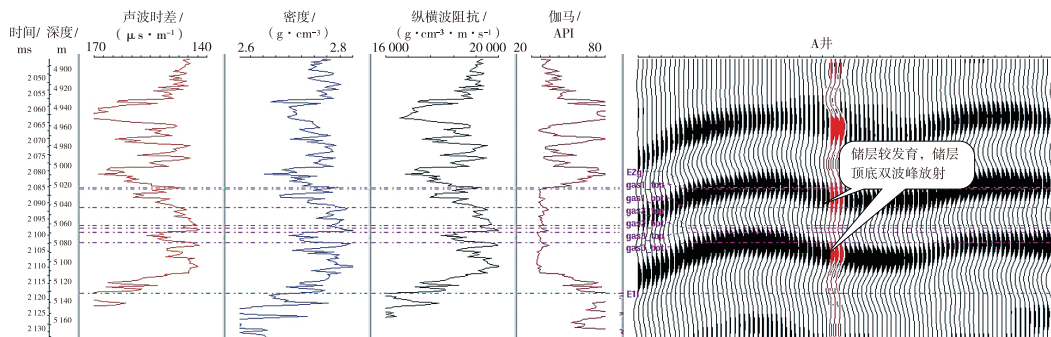


图2 HC地区龙王庙组A井井震精细标定

若不考虑储层因素的影响,龙王庙组顶界是高台组底部的白云质粉砂岩与龙王庙组白云岩接触的界面,底界是龙王庙组白云岩和下伏沧浪铺组顶部砂岩接触的界面,龙王庙组整体高阻抗,与上下围岩阻抗差异明显,理论上龙王庙组顶界是强振幅、高连续的波峰反射,底界是强波谷反射。工区内由于岩性横向变化、龙王庙组颗粒滩储层发育的位置以及储层厚度的变化,致使高台组底界反射波特征和能量有一定变化^[11]。当储层发育时,速度大幅降低,与围岩形成较大的波阻抗差,储层段会在

龙王庙组内部形成“亮点”反射^[11-13](图3)。

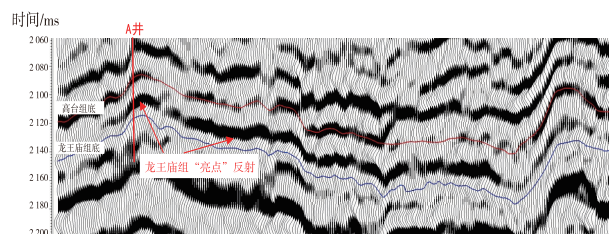


图3 HC地区龙王庙组地震剖面

2.2.2 储层地震响应模式

为了更合理地建立龙王庙组优质储层识别模

式,以工区内龙王庙组地层结构为基础,由已钻井的测井曲线统计目的层及其上下地层的速度、密度和地层厚度,建立储层正演模型。龙王庙组构造平缓,具有地层厚度变化不大但内部储层厚度变化大的特点,选取基于射线追踪的正演模拟方法,进行龙王庙组储层地震响应特征分析^[14-15]。

从图4的正演模型响应可以看出,龙王庙组的地震响应特征主要有三类:①龙王庙组储层发育且靠近顶部(储厚40~70 m),反射特征表现为顶界波谷或者零界点,内部储层底界“亮点”反射;②龙王庙组发育较厚储层(储厚15~40 m),靠近顶部或位于中部,反射特征表现为顶部波峰,内部弱波峰反射,区内的油气高产井A井即为第二种反射特征;③龙王庙组储层发育较差(储厚小于15 m),反射特征表现为顶界强波峰,内部空白反射,几乎不能识别。总体而言,储层越发育,地震反射特征上龙王庙组内部能量越强,顶界能量越弱。

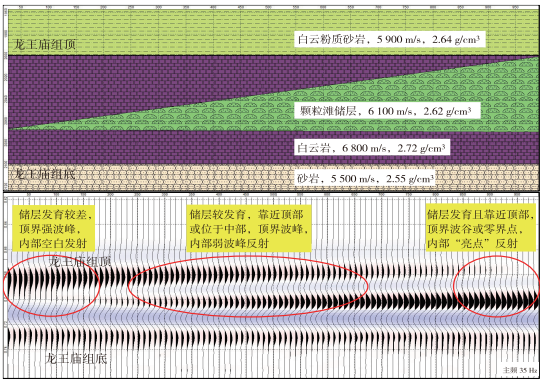


图4 HC地区地质模型及正演模拟记录

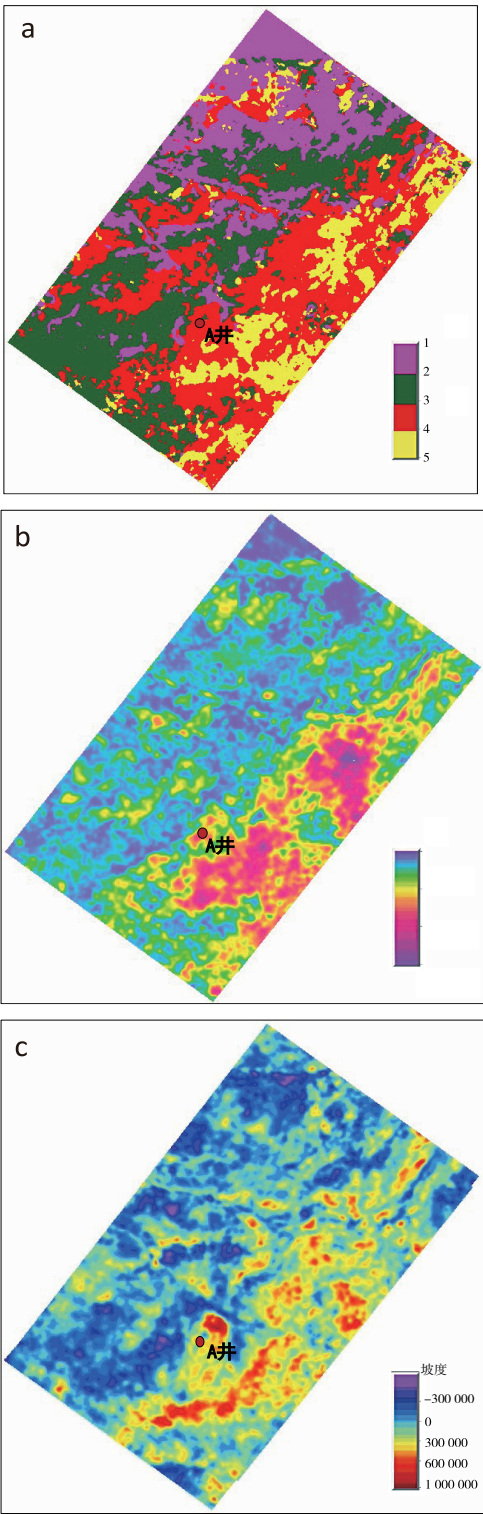
3 优质白云岩滩相储层地震预测

3.1 多参数地震属性分析

从20世纪60年代至今,地震属性研究的发展已经到了基本成熟的阶段^[16]。储层发育情况决定地震反射模式,而地震反射模式又决定了优选敏感性储层识别技术^[17]。通过将目标时窗内的地震波形进行分类,可以区分不同的沉积体^[18]。根据前面的储层地震响应模式“储层越发育,地震反射特征上龙王庙组内部能量越强,顶界能量越弱”、“储层顶界影响龙王庙组顶反射,储层底界对应内部亮点强波峰^[17]”的思路选取龙王庙组内部最大波峰振幅属性技术和反射强度坡度雕刻技术来刻画内部亮点颗粒滩相储层。

波形分类技术通过神经网络算法统计目的层时窗内的地震道波形,划分出单元内差异相对较大的

几种波形,研究地震波形结构变化以识别岩性或储层的变化。由波形分类结果(图5a)可知,工区内龙王庙组主要发育一条北东向条带状展布的滩体(红-黄色区域),地震剖面上龙王庙组内部呈“亮点”强波峰反射。绿-粉色区域为滩间,主要为强波谷反射。



a.波形分类属性; b.最大波峰振幅属性;
c.反射强度坡度属性

图5 HC区块龙王庙组地震属性预测平面图

最大波峰振幅表示某一时窗内所有波峰的振幅值的最大者,可识别目的层段由于岩性或储层变化引起的振幅异常。图5b最大波峰振幅属性可较好地识别内部强波峰反射变化,储层横向差异特征明显,亮点强波峰储层发育好,主要位于A井东部,呈北东向展布,弱波峰指示储层发育较差。

反射强度坡度属于瞬时类属性,将每道的振幅值转换为反射强度,针对目的层选取合适的时窗,用最小二乘法拟合反射强度值与反射时间的曲线关系,该曲线的斜率即为所求属性,可以识别振幅异常的纵向变化^[3]。图5c反射强度坡度地震属性平面图较好地刻画了龙王庙组颗粒滩储层横向发育特征:A井以东区域以红-黄暖色调为主,反映厚层滩体发育,其它以蓝-青冷色调为主,表明储层变差。

3.2 多方法联合反演预测

不同岩性地层的分界面主要靠地震波的波阻抗界面来反映,地震波阻抗的表达式为

$$Z = \rho \cdot v = \rho / AC \quad (1)$$

其中, Z 为地震波阻抗, $g/cm^3 \cdot m/s$; ρ 为地层密度, g/cm^3 ; v 为地层速度, m/s ; AC 为声波时差, $\mu s/m$ 。

地震波阻抗将地震、测井和地质联系在一起,岩性差异会导致波阻抗的差异,波阻抗反演是基于地震数据表征地下储层的重要手段,与振幅频率、波形分类等统计性方法相比,波阻抗反演具有明确的物理意义,赋予地震反射波组明确的地质属性,是储层岩性、物性预测和油气藏特征描述的确定性方法,是储层预测的核心技术^[19]。

3.2.1 岩石物理敏感参数分析

地震岩石物理分析是储层预测模式建立的基础,基于已钻井资料,分析目的层段岩性、物性和含气性与叠后地球物理参数的关系,明确能识别储层的敏感参数,为后续储层反演提供理论依据。

区内龙王庙组储层岩性以颗粒滩相沉积的残余砂屑、鲕粒云岩为主,储层平均孔隙度3.9%,平均渗透率 $0.359 \times 10^{-3} \mu m^2$,孔隙-小孔洞型储层为主,储集空间主要为粒间溶孔、晶间溶孔和表生顺层扩溶孔洞缝。绘制不同岩性、含不同流体情况储层的岩石物理直方图,可以识别出对储层敏感的参数。

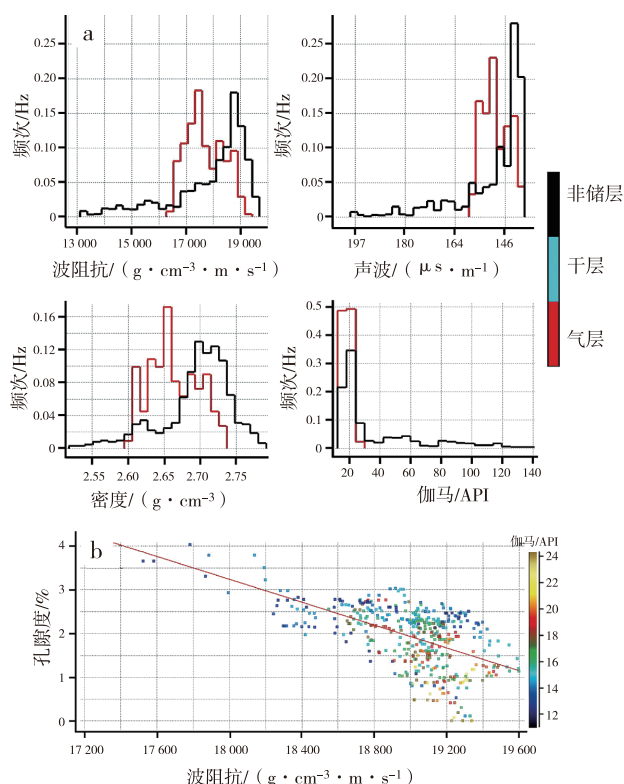
图6a储层参数直方图中,红色代表气层,淡蓝色代表干层,黑色代表非储层,从图中可以看出,储层和非储层的速度、密度、波阻抗有部分重叠,但储层高声波时差、低密度,整体具有低阻抗特征,非储

层表现为高阻抗,利用波阻抗可有效区分龙王庙组的储层和非储层。优质储层的阻抗频带范围主要分布在 $16\,520 \sim 18\,920 g/cm^3 \cdot m/s$,选取计算储层厚度的阻抗门槛值为 $18\,130 g/cm^3 \cdot m/s$ 。

为了进一步确定波阻抗对岩性、物性和含气性的预测能力,取纵波阻抗和测井孔隙度进行交汇分析,去除干层和非储层干扰,可以看出阻抗和孔隙度呈很好的线性关系(图6b),相关系数-0.82,随着阻抗的增大孔隙度减小,其拟合公式为

$$Y = -0.000\,013\,064\,6X + 0.267\,558 \quad (2)$$

其中, Y 为孔隙度,%; X 为阻抗, $g/cm^3 \cdot m/s$ 。可以利用纵波阻抗进行储层孔隙度预测。



a.测井解释直方图; b.储层阻抗与孔隙度交汇图

图6 龙王庙组储层测井分析

3.2.2 储层反演结果分析

可以通过联井剖面、平面展布分析,预测反演结果的可靠性。最好的分析方法是做盲井检验,抽取工区内不参与计算的井,通过波阻抗剖面来验证反演结果的质量,因此设置了区内A1井为盲井。图7为过A、A1井的联井波阻抗反演剖面,蓝色曲线为测井声波阻抗曲线,从图7可以看出,波阻抗反演结果与井点处吻合较好,A、A1井储层呈低波阻抗特征。因龙王庙组储层孔隙度与波阻抗具有良好的相关性,在获得波阻抗预测结果后,便可在储层内部开展孔隙度预测。

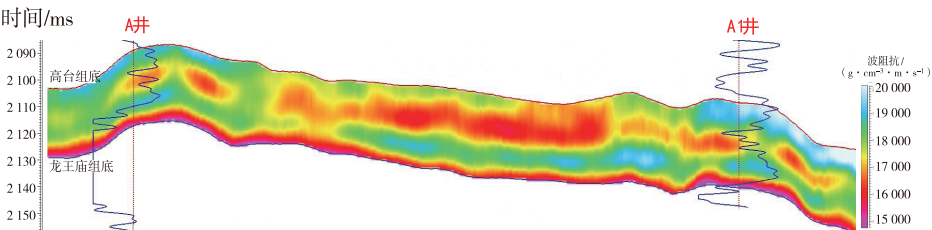
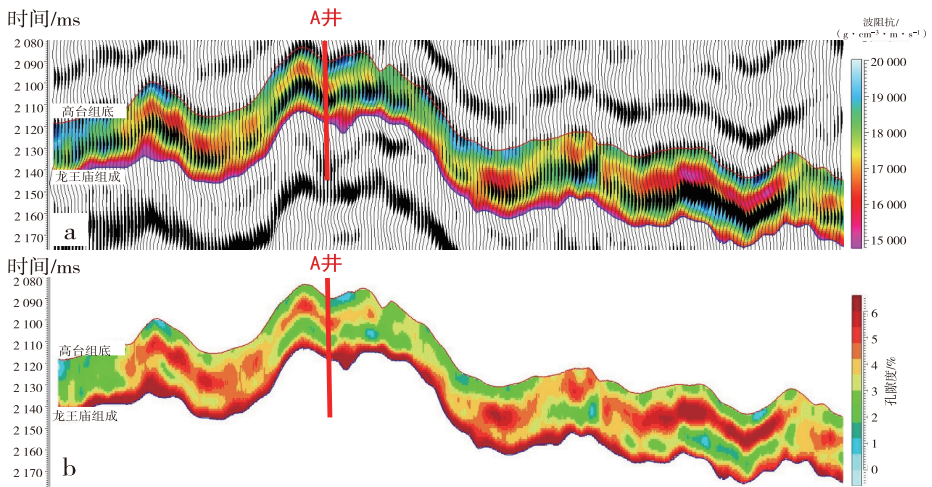


图 7 龙王庙组反演连井波阻抗剖面

从图 8a 波阻抗剖面中可以看出, 储层反演结果与龙王庙组内部“亮点”地震强波峰有较好的对应关系, 储层整体呈低阻抗特征。图 8b 为孔隙度剖面

面, 红-黄暖色调代表孔隙度高的优质白云岩储层, 纵向分辨率更高, 优质储层的孔隙度多在 3% 以上。

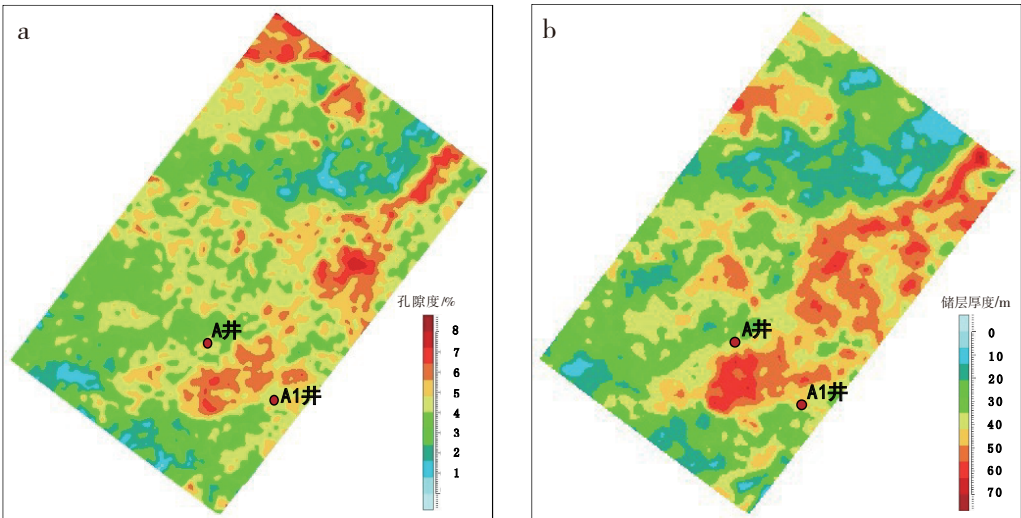


a. 波阻抗剖面; b. 孔隙度剖面

图 8 龙王庙组反演地震剖面

图 9a 为基于孔隙度预测结果提取的龙王庙组储层孔隙度平面图, 总体上工区内优质白云岩储层

孔隙度为 3% ~ 7.5%, 其中工区北东向条带部位储层物性较好, 且内部分为多个分隔的颗粒滩体。



a. 孔隙度 b. 储层厚度

图 9 龙王庙组储层定量预测结果

一般白云岩储层有效厚度为孔隙度大于等于2%的统计厚度,因此在储层展布预测和孔隙度预测结果的基础上,提取龙王庙组孔隙度大于等于2%的样点数目即可实现孔隙度的储层厚度定量预测。图9b为龙王庙组储层厚度预测图,从图中可以看出,龙王庙组滩体储层呈北东向展布,与磨溪主体展布方向一致,厚度介于5~70 m之间,A井以东地区储层厚度大,与地震属性异常可较好对应,且与实钻数据较吻合。

表1为区内龙王庙组钻井实钻储层厚度和波阻抗反演得到的储层预测厚度对比表,可以看出,预测的厚度误差均在4 m内,预测结果与井点吻合。

表1 龙王庙组反演储层厚度误差 m

井名	实钻厚度	预测厚度	预测误差
A井	33.0	32.6	0.4
A1井	40.3	36.6	3.7

4 结论

(1)在储层精细井震标定及正演模拟的基础上,多参数地震属性技术可以定性预测优质白云岩储层的平面分布,储层波阻抗展布预测和孔隙度预测相结合的储层厚度定量预测技术可有效识别出薄层储层的厚度,与地震属性异常可较好对应,颗粒滩相储层识别率高;

(2)研究认为川中HC地区龙王庙组滩体储层呈北东向展布,与磨溪主体展布方向一致,厚度介于5~70 m之间,A井以东地区为储层发育有利区,厚层滩体发育区内,存在多个分隔的颗粒滩体。

参考文献:

- [1] 陈代钊,钱一雄.深层—超深层白云岩储集层:机遇与挑战[J].古地学报,2017,19(2):187-196.
- [2] 杜金虎,邹才能,徐春春,等.川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J].石油勘探与开发,2014,41(3):268-277.
- [3] 张光荣,冉崎,廖奇,等.四川盆地高磨地区龙王庙组气藏地震勘探关键技术[J].天然气工业,2016,36(5):31-37.
- [4] 姚根顺,周进高,邹伟宏,等.四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J].海相油气地质,2013,18(4):1-8.
- [5] 王修齐,许红,宋家荣,等.高石梯—龙王庙大气田发现与四川盆地震旦—寒武系油气地质特征及成藏[J].海洋地质前沿,2016,32(3):24-32.
- [6] 冯伟明,刘建清,谢渊,等.上扬子区龙王庙期碳酸盐岩台地模式及油气勘探[J].特种油气藏,2015,22(1):61-65,153.
- [7] 周进高,房超,季汉成,等.四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律[J].天然气工业,2014,34(8):27-36.
- [8] 周进高,徐春春,姚根顺,等.四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J].石油勘探与开发,2015,42(2):158-166.
- [9] 袁海锋,赵明霞,王国芝,等.川中磨溪构造寒武系龙王庙组油气运聚期次[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6):694-702.
- [10] 孟宪武,朱兰,王海军,等.川西南地区下寒武统龙王庙组储层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(2):180-187.
- [11] 李亚林,巫芙蓉,刘定锦,等.乐山—龙女寺古隆起龙王庙组储层分布规律及勘探前景[J].天然气工业,2014,34(3):61-66.
- [12] 李素华.四川盆地资阳地区龙王庙组优质储层识别与分布预测[J].海相油气地质,2017,22(1):55-61.
- [13] 张光荣,廖奇,喻颐,等.四川盆地高磨地区龙王庙组气藏高效开发有利区地震预测[J].天然气工业,2017,37(1):66-75.
- [14] 张晓斌,刘晓兵,赵晓红,等.地震资料提高分辨率处理技术在乐山—龙女寺古隆起龙王庙组勘探中的应用[J].天然气工业,2014,34(3):74-79.
- [15] 何宇霖,刘庆松,戴菁芸.四川盆地川中地区龙王庙组多波储层预测技术及效果评价[J].内蒙古石油化工,2018,44(8):78-80.
- [16] 陆基孟.地震勘探原理[M].东营:石油大学出版社,1993.
- [17] 代瑞雪,冉崎,关旭,等.非均质滩相储层地震识别及预测技术[C]//2018油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2018)论文集,西安:西安华线网络信息服务有限公司,2018,1395-1403.
- [18] 肖秋红,李雷涛,屈大鹏,等.YB地区长兴组礁滩地震相精细刻画[J].石油物探,2012,51(1):98-103.
- [19] 孙月成,马光克,隋波,等.扩展的弹性阻抗及其在储层预测中的应用[J].天然气工业,2013,33(3):28-32.

(编辑 杨芝文)