

三维地震解释技术及其在储层描述中的应用 ——以松辽盆地杏树岗油田 X56 区块为例

王彦辉¹, 姜岩¹, 张秀丽¹, 李操¹, 朴昌永¹, 宋丽君², 高鹏³

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂, 黑龙江大庆 163257; 3. 中国石油大庆油田有限责任公司第二采油厂地质大队, 黑龙江大庆 163257)

摘要:针对大庆长垣油田高含水后期井-震结合储层描述的目标尺度小、精度要求高、井网密等特点,以松辽盆地杏树岗油田 X56 区块为研究区,在精细地质研究成果的基础上,充分利用三维地震资料,形成了一套大庆长垣油田井-震结合构造解释、断层识别、储层预测配套技术。通过容量维分形技术,识别了断距 5 m 左右的小断层,解决了井间小断层识别难题;利用井-震结合构造解释成果,搞清了断层的平面组合特征及延伸范围,落实了微幅度构造及其与油气分布关系;采用地震随机反演技术,对葡一组储层砂体厚度进行了平面预测和井间砂体连通性分析,2 m 以上砂体预测符合率达到 75% 以上。在此基础上,进一步修正了仅用井孔资料绘制的沉积微相图,精细刻画了河道砂体的平面展布特征。井-震结合三维地震技术在长垣油田多个区块应用,效果明显。

关键词:断层;构造;沉积微相;三维地震解释技术;储层描述;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

3D seismic interpretation technology and its application in reservoir description ——an case from X56 block of Xingshugang oilfield, Songliao Basin

Wang Yanhui¹, Jiang Yan¹, Zhang Xiuli¹, Li Cao¹, Piao Changyong¹, Song Lijun², Gao Peng³

(1. Exploration & Development Research Institute, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163712, China;

2. No. 1 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163257, China;

3. No. 2 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163257, China)

Abstract: Well-seismic integrated reservoir characterization of Daqing Changyuan oilfield at late high water cut development stage faces the challenges of small scale of description target, high requirement for predication accuracy and dense well pattern. Taking Block X56 of Xingshugang oilfield in the Songliao Basin as an example, we developed a set of technologies consisting of well-seismic integrated structure interpretation, fault identification and reservoir prediction by utilizing 3D seismic data and fine geologic study results. The capacity-dimension fractal technology is applied to recognize small faults with throw of about 5 m, solving problems of small faults identification between wells. The plane combination characteristics and extensions of faults are defined and the relationship between low amplitude structure and oil-gas distribution is determined by using well-seismic integrated structure interpretation technology. Reservoir sandbody thickness in the 1st member of Putaohua Formation is mapped and the sandbody connectivity between wells is analyzed with the stochastic inversion technology. The coincidence rate of prediction of sandbodies with thickness above 2 meters is more than 75%. On this basis, sedimentary microfacies map drawn only by borehole data is further revised, and the planar distribution features of channel sandbody are characterized. The well-seismic integrated 3D seismic interpretation technology has been applied in several blocks of Changyuan oilfield and the results are satisfactory.

Key words: fault, structure, sedimentary microfacies, 3D seismic interpretation technology, reservoir description, Songliao Basin

杏树岗油田为大庆长垣的主力油田之一,油田面临的主要问题是主力砂体的空间展布、连通性复杂及井资料难以识别井间小断层和微幅度构造,给油田的

整体开发造成很大的困扰。为解决上述问题,以杏树岗油田 X56 区块为主要研究区,通过对三维地震资料的精细构造解释、储层预测、多井约束地震反演等技术

收稿日期:2012-10-12;修订日期:2013-02-25。

第一作者简介:王彦辉(1968—),男,高级工程师,开发地震解释与应用研究。E-mail: wangyh_dqyc@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05009)。

的应用,结合地质和测井资料,探索出适用于大庆长垣油田的基于三维地震资料的精细储层描述技术方法。在此基础上,利用以上研究的成熟技术对杏树岗油田的构造特征和储层砂体分布规律进行了精细描述。

1 井-震联合精细构造解释

在油田开发过程中,小断层及微幅度构造往往是剩余油富集区的主要场所,对开发方案调整、完善注采关系、提高水驱开发效果具有重要影响,因此成为油田开发阶段构造研究的重点。充分利用并挖掘井-震联合勘探的潜力,能有效提高油田开发阶段小尺度地质体的构造描述精度,并为储层描述提供更准确的构造模型^[1-3]。

以往大庆油田的构造图基本上是以油田开发初期二维地震资料为基础,结合后期单井解释断层编制而成,但中、小断层的延伸长度、走向、搭接关系还存在一定偏差,不利于断层附近潜力区的开发调整挖潜。目前,随着三维地震在大庆长垣油田的应用,通过井-震结合三维地震资料的精细构造解释,准确识别了微幅度构造和井间小断层,提高了断层及构造的解释精度。

1.1 小断层识别技术

对于断距 10 m 左右的较大断层,可利用方差数据体、时间切片、三维可视化技术以及邻道时差图、邻道振幅差值图、沿层振幅图、倾角图、层方位角图等辅助手段对目的层断层进行全方位细致的断层解释;对于断距 5 m 左右小断层,在地震剖面上及常规技术手段难以识别。为此开发了容量维分形技术识别小断层的新方法,使主要目的层处断距 5 m 左右小断层均可以识别。

1.1.1 容量维的计算方法

分形理论中,描述分形特征的主要参数是分形维。地震波形往往具有分形特征^[4-5]。容量维是分形维中的一种。地震波的传播及反射特性与地质构造(如小断层)有关,因此,可以提取地震反射波的分形参数用于小断层的预测^[6-7]。如果地下存在小断层,那么地震波振幅将发生变化,其容量维 D_0 将增大,因此,容量维较大的地震道将可能是有小断层的标志。

在实际应用中,对于给定的地震道的时间序列,采用 R/S 分析(Rescale range analysis)算法计算容量维较为方便。容量维的计算过程如下:

$$P_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} p_i \quad \tau = 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$X(i, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (p_i - P_\tau) \quad 1 \leq i \leq \tau,$$

$$\tau = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) - \min_{1 \leq i \leq \tau} X(i, \tau) \quad (3)$$

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - P_\tau)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: p_i 是地震道记录的时间序列; τ 是步长; P_τ 是 τ 步长下的均值; $X(i, \tau)$ 是累计离差; $R(\tau)$ 是极差; $S(\tau)$ 是标准差。

Mandelbrot 证明, $R(\tau)$ 是步长 τ 的随机函数且具有标度性质^[8]:

$$R(\tau) \sim \tau^H \quad (5)$$

一般情况下,真实标准差 $S=1$ 。因此,

$$R(\tau)/S(\tau) \sim \tau^H \quad (6)$$

上式即 Hurst 经验规律在分形意义下的推广^[8]。从时间序列计算出 $R(\tau)/S(\tau)$ 的值,根据式(6),在双对数坐标系中对点 $\{\lg \tau, \lg [R(\tau)/S(\tau)]\}$ 作线性回归,回归出的直线斜率即为 H 。

$$D_0 = 2 - H \quad (7)$$

D_0 即为所求的容量维。

1.1.2 应用实例

利用容量维技术在 X56 区块葡一组油层进行了小断层识别的研究,首先从理论模型来分析容量维技术识别小断层的可行性。

针对葡一组油层的储层实际特点,设计了断距为 5 m 的理论地质模型,并由理论地质模型合成了地震剖面(图 1a, b),从地震剖面上看,小断层位置上的地

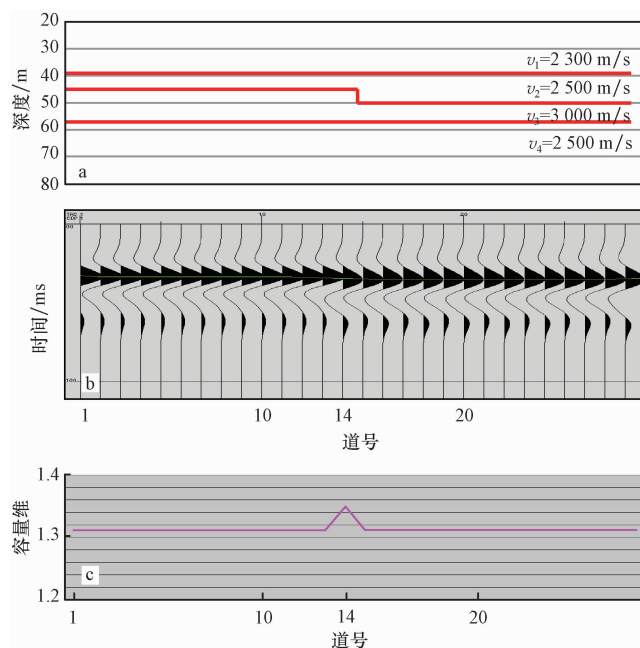


图1 断距为 5 m 的理论地质模型计算的容量维曲线
Fig.1 Capacity-dimensional curve of faults with a throw of 5 m computed by using the theoretical geological model

a. 断距 5 m 的地质模型; b. 地质模型合成的地震剖面;
c. 由理论地震剖面计算的容量维

震剖面同相轴波组特征连续,在地震剖面上很难反映 5 m 小断层存在的位置(道号 = 14);但从由断距为 5 m 的理论地震剖面计算的容量维曲线上看(图 1c),在断层的位置(道号 = 14)的容量维的维数突然变大,以此可作为小断层识别的标志。

图 2 是在 X56 区块利用实际的地震剖面计算容量维的维数结果。同样,在常规地震剖面上很难识别目的层上的小断层的存在,而在容量维曲线上维数突然增大的位置对应地震剖面存在的小断层的位置。

利用该项技术结合地震同相轴波组特征,共解释 8 条小断层。落实 7 条小断层,去掉一条岩性变化引起的小断层,小断层识别的符合率达到 85% 以上。

1.2 井-震联合确定断层组合特征

井-震联合断层解释后,断层组合结构发生很大变化(图 3),与仅用井孔资料相比,利用地震资料解释后,大断层搭接关系发生一些变化,增加 7 条小断层,细节更加突出,断层组合结构更加合理。井-震结合断层解释技术的应用可以较好地解决断层组合的问题。

1.3 井-震联合精细刻画井间微幅度构造形态

常规采用平均速度进行时深转换编制的构造图不利于突出构造细节变化,本次利用变速成图技术可突出局部微幅度构造,提高了构造图成图的精度。经 19 口开发后验井的检验,构造图的对井深度平均相对误差为 0.2%,能够满足油田开发的需求。

井震联合精细构造解释后发现了 12 个微幅度构造,总面积为 3.228 km²。微幅度圈闭内都有高产井存在,这也为寻找剩余油分布提供了依据。

如以前对杏 7-丁 2-斜 132 井的高产原因不是很清楚,通过三维地震精细解释后发现,该井处于局部构造高点,闭合幅度 23 m,形成了一个小的局部构造,

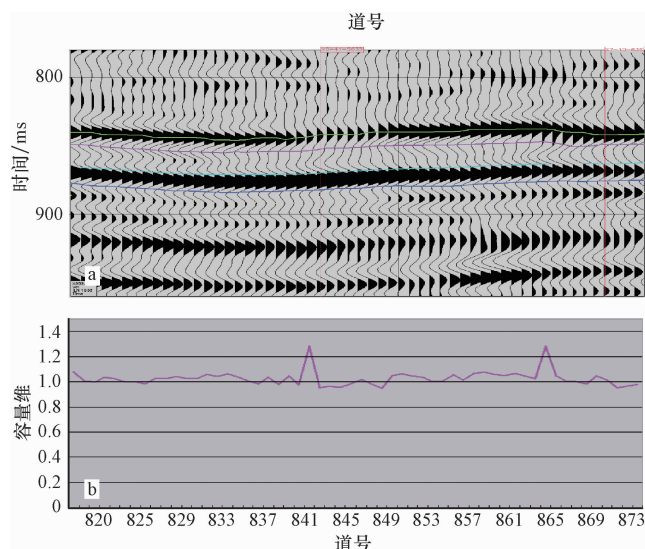


图 2 X56 区块容量维技术识别小断层

Fig. 2 Identification of small faults in X56 block by using the capacity-dimensional technology

a. 实际地震剖面;b. 由实际地震剖面计算的容量维

封闭性较好,成为开发中后期剩余油的富集区(图 4)。该井射开 P I² 和 P I³ 等层,砂岩厚度 19.8 m,有效厚度 17.6 m,初期日产油 38 t,1998 年 9 月中旬抽改电后日产油由 45 t 增加到 89 t,截止 2005 年 12 月,累计采油 129 934 t。

2 密井网开发区储层预测技术

储层描述的主要目标之一就是対地下储层精细刻画,准确描述储层三维的空间位置及其形态。近几年,地震反演技术已成为地震储层描述中的一项主要技术,它主要是用地震反射资料,反推地下的波阻抗或速度的分布。该技术能够直观地反映地下储集砂体纵、横向连续变化规律,是进行储层描述、指导油田开发的有效手段,并有许多成功的实例^[9-12]。

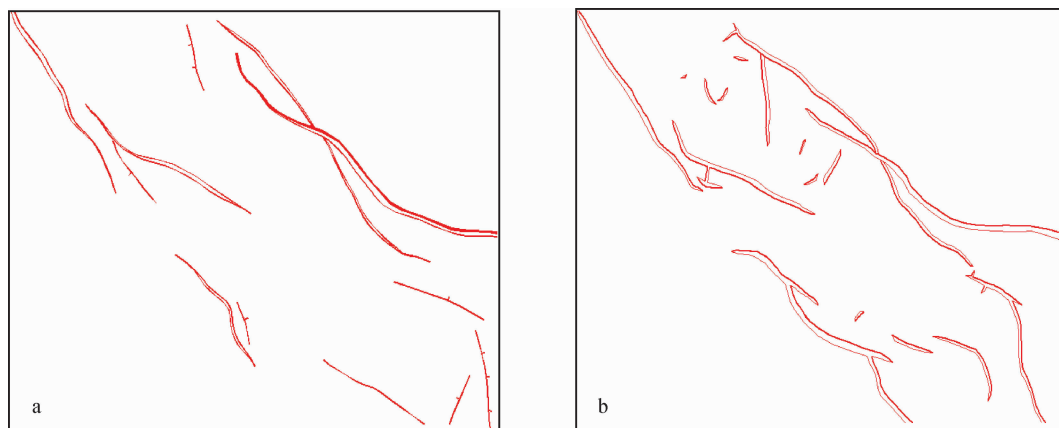


图 3 X56 区块葡一组顶面断层变化对比

Fig. 3 Comparison chart of fault changes on the top of the 1st member of Putaohua Formation in X56 block

a. 地震解释前;b. 地震解释后

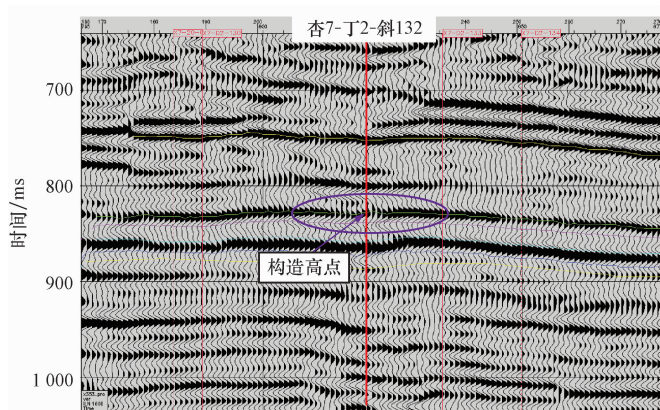


图4 X56区块过杏7-丁2-斜132井的微幅度地震剖面

Fig. 4 Micro-structure seismic profile crossing Well X7-D2-X132 in X56 block

2.1 地质统计学随机反演

结合杏树岗油田 X56 区块的资料情况,对该区并约束地震反演方法进行了储层预测可行性分析,并在此基础上,针对储层预测的多种反演方法进行对比试验分析,优选地质统计学随机反演方法。

随机地震反演是以测井、地震、地质资料为基础,将随机模拟的理论与地震反演相结合的反演方法,它能有效地提高地震资料的垂向分辨率,避免过分依赖初始模型,充分考虑地下地质的随机特性,使反演结果更加符合实际地质情况^[13-14]。

随机反演能很好地将测井垂向上的高分辨率与地震在横向上的连续性结合起来,反演结果与井可以达到最佳吻合,而且反演结果还突破了地震频带宽度的

限制,可以获得高分辨率的地层波阻抗资料以及其他岩性参数,使地震对储层的预测精度大大提高^[15]。随机反演方法适合于密井网区油田开发阶段,能适应精细储层预测及开发阶段油气研究。

2.2 随机反演结果分析

根据井-震结合地震随机反演结果,在 X56 区块进行了井-震结合沉积微相对比和储层砂体预测。

图5为随机反演与过井剖面沉积微相对比图,随机反演的砂体(图5b)与过井剖面沉积微相的砂体(图5a)分布有较好的对比关系,对储层预测和砂体连井对比有较好的指导作用,可以进行井间砂体的预测。而且相对于波阻抗反演来说,随机反演的分辨率提高了很多。

用50口未参加反演的井去验证随机反演对井间砂体的预测精度,砂体预测平面分布与单井砂体有较好的吻合(图6)。从X56区块后验井的小层砂体钻井统计厚度与随机反演预测厚度对比可以看出,绝对误差超过2.0 m的井较少,预测误差较大的基本都是砂岩厚度小于2 m的井。 PI^1 , PI^2 , PI^3 , PI^{3-3} 层的井点厚度与预测厚度的线性相关度较高,其相关系数分别为0.718, 0.877, 0.874, 0.767, 砂体预测总符合率分别为76.7%, 81.1%, 86.5%, 83.8%。厚度大于4 m的砂岩预测符合率为92.9%,厚度2~4 m的砂岩预测符合率为76.9%。

2.3 利用地震随机反演结果提高对河道砂体的认识

以往储层沉积微相主要依靠测井资料来预测河道

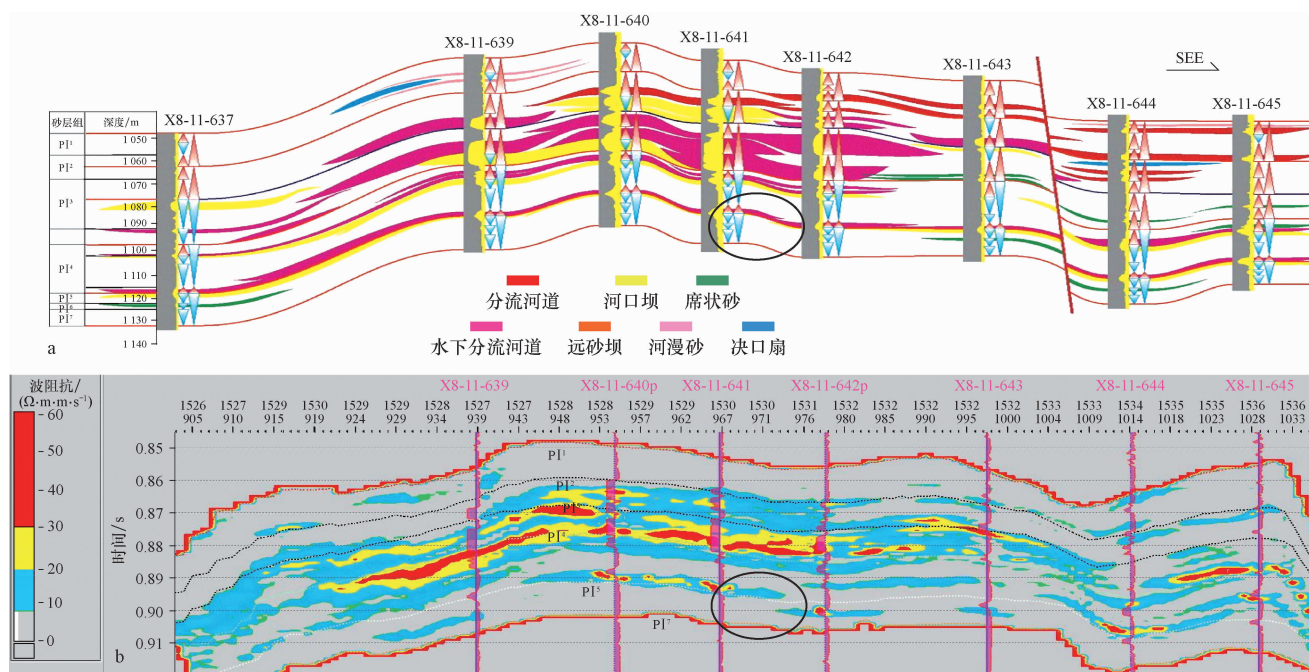


图5 X56区块地震随机反演与过井剖面沉积微相对比

Fig. 5 Comparison of sedimentary microfacies between seismic stochastic inversion profile and cross-well profile in X56 block

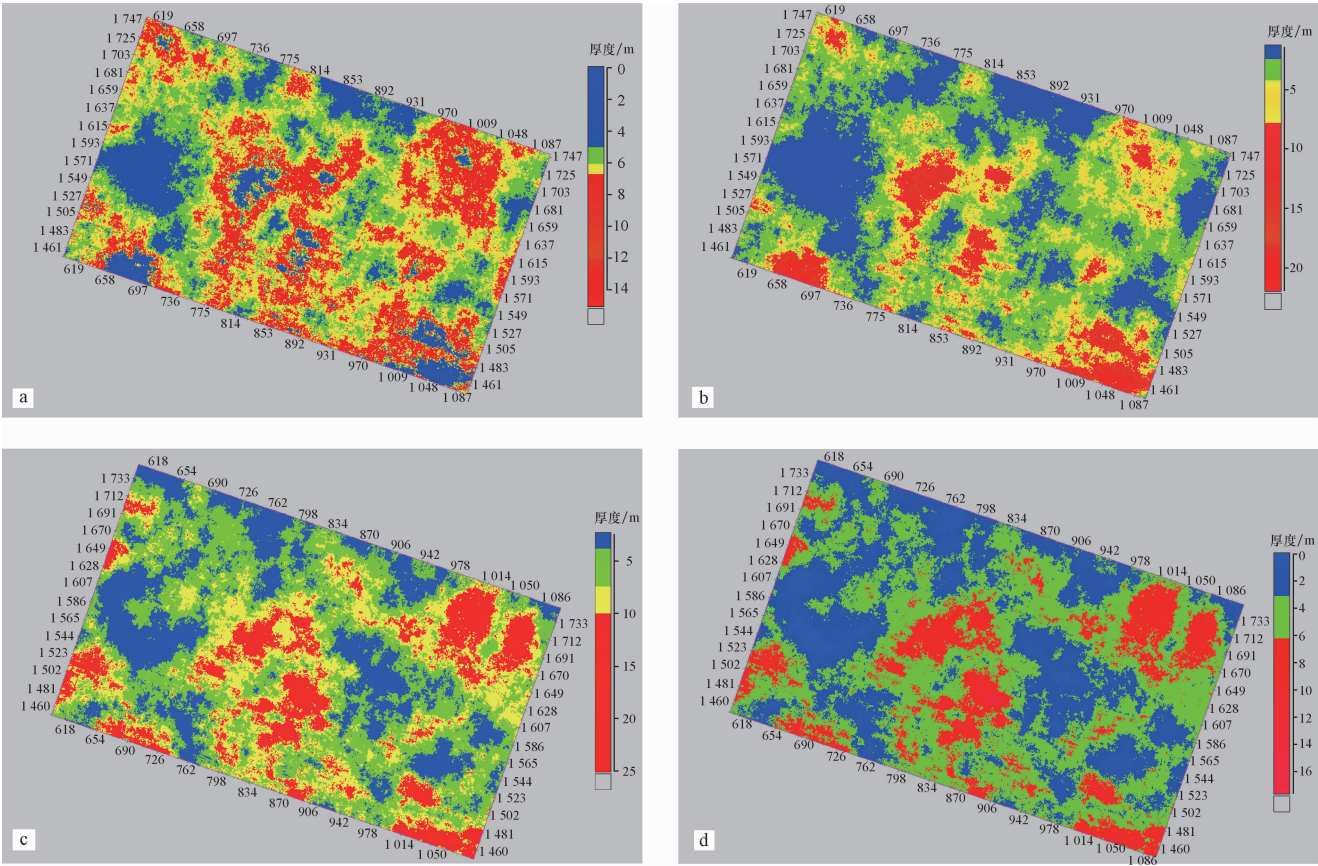


图 6 X56 区块葡一组油层砂岩厚度预测
Fig. 6 Isopach of sandstone in the 1st member of Putaohua Formation in X56 block
a. PI^1 层; b. PI^2 层; c. PI^3 层; d. PI^{3-3} 层

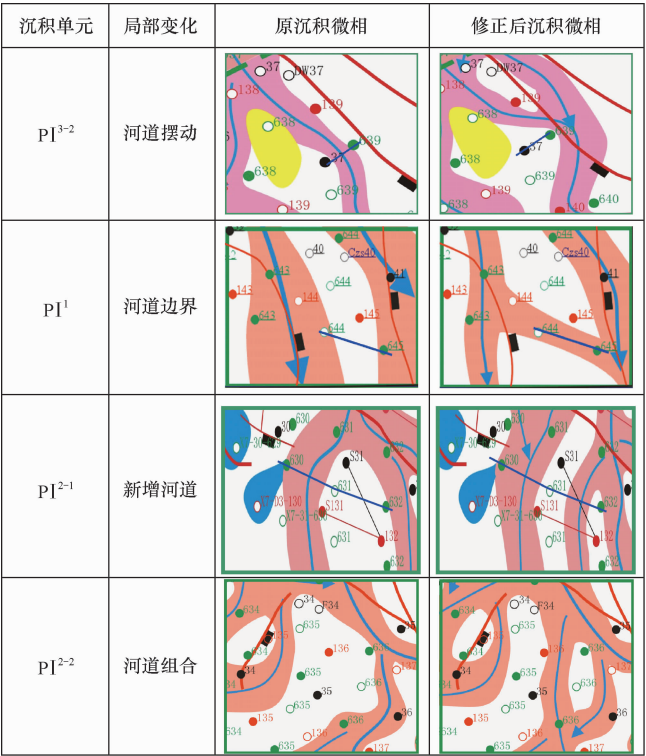


图 7 X56 区块井-震结合沉积微相修正
Fig. 7 Sedimentary microfacies revision through well-seismic integration in X56 block

砂体分布,然而因砂体内部薄夹层规模较小、砂体薄厚极不稳定等因素影响,井间可对比性差,需要通过地震准确预测井间砂体分布^[16]。综合钻井地质信息,利用地震反演资料能够清晰地勾绘出砂体的展布形态和特征,最终完成井-震联合沉积微相修正^[17]。

本区在 PI 层发育的沉积环境主要是河控三角洲相,储集砂体空间变化比较的频繁,所以单井难以有效控制沉积砂体的变化,无法准确预测河道及其沉积微相的空间配置关系。为提高对河道砂体类型的认识程度,本次采用随机地震反演进行了井间河道砂体的预测,集中对河道砂体的沉积演化进行了修正,具体体现在河道的摆动、河道边界、新增河道、河道组合的接触关系等 4 方面(图 7)。

3 结论

1) 通过三维地震资料的精细构造解释,可识别目的层顶面幅度 5 m 以上的微幅度构造和断距 5 m 左右井间小断层,提高了现有井网条件下构造图的解释精度,为精细开发调整方案的编制奠定了地质基础。

2) 微幅度构造为局部油气的聚集提供了良好的场所。研究区内的开发井资料已证实油气聚集与微幅

度构造密切相关。

3) 利用地震反演技术提高了井网控制不住的井间砂体的预测精度,2 m 以上砂体预测符合率达到75%以上,落实了储层砂体平面和空间分布形态。

4) 地震随机反演技术与精细地质研究相结合,修正了平面沉积微相图。通过研究形成一套适用于老油田井-震结合精细储层描述方法,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 甘利灯,戴晓峰,张昕,等.高含水油田地震油藏描述关键技术[J].石油勘探与开发,2012,39(3):365-376.
Gan Lideng, Dai Xiaofeng, Zhang Xin, et al. Key technologies for the seismic reservoir characterization of high water-cut oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 365-376.
- [2] 邓维森,林承焰.葡萄花和敖包塔油田葡I组油层低级序断层的地震识别[J].石油物探,2010,49(1):79-84.
Deng Weisen, Lin Chengyan. Seismic identification of low-level faults in Pu I reservoir of Putaohua and Aobaota oilfields[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(1): 79-84.
- [3] 张昕,甘利灯,刘文岭,等.密井网条件下井震联合低级序断层识别方法[J].石油地球物理勘探,2012,47(3):462-468.
Zhang Xin, Gan Lideng, Liu Wenling, et al. Joint well-seismic interpretation of low-grade faults in dense well pattern block[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 462-468.
- [4] 何光明,高如曾.分形理论在裂缝预测中的尝试[J].石油物探,1993,32(2):1-13.
He Guangming, Gao Ruzeng. Attempt to predict the fracture with fractal theory[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1993, 32(2): 1-13.
- [5] 乐友喜,王才经.计算地震道关联维的G-P方法研究[J].石油地球物理勘探,1996,31(1):14-20.
Le Youxi, Wang Caijing. Research on G-P method for computing the associative dimension of seismic traces[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(1): 14-20.
- [6] 朱剑兵,纪友亮,李储华.利用分形维数定量表征断裂发育程度[J].石油学报,2005,26(5):53-56.
Zhu Jianbing, Ji Youliang, Li Chuhua. Quantitative characterization of development degree of fractures in fault system by fractal dimension[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 53-56.
- [7] 崔若飞,徐东.利用分形技术和人工神经网络技术检测小断层[J].中国矿业大学学报,1999,28(3):258-261.
Cui Ruofei, Xu Dong. Detection of minor faults using both fractal and artificial neural network techniques[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(3): 258-261.
- [8] Mandelbrot B B. Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman and company, 1982.
- [9] 李传江,葛玉辉,李林山.大庆榆树林油田地震资料反演技术应用评价[J].世界地质,2008,27(3):291-297.
Li Chuanjiang, Ge Yuhui, Li Linshan. Evaluation of seismic inversion technique in Yushulin oilfield of Daqing[J]. Global Geology, 2008, 27(3): 291-297.
- [10] 赵斌,刘维永,黄江波,等.地震综合解释技术在渤海A油田开发中的应用[J].石油地质与工程,2010,24(5):80-83.
Zhao bin, Liu Weiyong, Huang Jiangbo, et al. The application of geophysical technology in Bohai A oilfield development[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(5): 80-83.
- [11] 安鸿伟,李正文,李仁甫,等.稀疏脉冲波阻抗反演在YX油田开发中的应用[J].石油物探,2002,41(1):56-60.
An Hongwei, Li Zhengwen, Li Renpu, et al. Application of sparse impulse impedance inversion in YX oil field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 56-60.
- [12] 王香文,刘红,滕彬彬,等.地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用[J].石油与天然气地质,2012,33(5):730-735.
Wang Xiangwen, Liu Hong, Teng Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 730-735.
- [13] 易平,林桂康.随机地震反演技术及在文昌13-1油田的应用[J].石油地球物理勘探,2005,40(1):87-91.
Yi Ping, Lin Guikang. Seismic stochastic inversion and its application in Wenchang 13-1 oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(1): 87-91.
- [14] 慎国强,孟宪军,王玉梅,等.随机地震反演方法及其在埕北35井区的应用[J].石油地球物理勘探,2004,39(1):75-81.
Shen Guoqiang, Meng Xianjun, Wang Yumei, et al. Random seismic inversion and its application in Chengbei No. 35 well zone[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(1): 75-81.
- [15] 王健,谢华锋,董洪奎,等.随机地震反演在岩性油气藏储层预测中的应用[J].科学技术与工程,2011,11(12):2640-2643.
Wang Jian, Xie Huafeng, Dong Hongkui, et al. An application of seismic stochastic inversion to lithologic reservoir prediction[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(12): 2640-2643.
- [16] 李占东,赵伟,李阳,等.开发地震反演可行性研究及应用——以大庆长垣北部油田为例[J].石油与天然气地质,2011,32(5):797-806.
Li Zhandong, Zhao Wei, Li Yang, et al. Feasibility study and application of development seismic inversion—a case study from northern Changyuan oilfield of Daqing[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 797-806.
- [17] 江青春,王海,李丹,等.地震波形分类技术应用条件及其在葡北地区沉积微相研究中的应用[J].石油与天然气地质,2012,33(1):135-140.
Jiang Qingchun, Wang Hai, Li Dan. Application conditions of seismic waveform classification technique and its use in the study of sedimentary microfacies of Pubei area[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 135-140.

(编辑 张亚雄)