

构造建模约束地震反演技术

——以大庆萨尔图油田南八区为例

李占东¹, 李吉¹, 李阳², 陈大有³, 赵伟⁴

[1. 东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆职业学院, 黑龙江 大庆 163255; 3. 中国石油 国际(PK) 有限责任公司, 哈萨克斯坦 克孜尔达 120001; 4. 中国石油 大庆油田公司 第六采油厂, 黑龙江 大庆 163114]

摘要:为了充分发挥储层预测多学科的综合能力,对构造建模约束地震反演的作用和构造建模在储层反演与地质建模的区别进行了分析。在此基础上,详细阐述了实现构造建模约束地震反演的4个关键环节,即井-震联合小尺度构造解释、合理设计地质框架、不同尺度网格设计和曲线均一化处理。以大庆萨尔图油田南八区萨Ⅱ7-12沉积单元为例,通过与未进行构造约束的地震反演对比,总结出构造建模约束地震反演的优势,主要体现在:①能够提高砂体识别的准确程度,尤其是定位河道砂边界位置效果显著,采用“井点定相、切片组形”的方法,完成了井震结合沉积微相的修正;②明确主力厚油层及主力砂体接触关系,增加断层附近预测的细节,尤其是断裂两侧砂体明朗化,有利于指导剩余油的挖潜。因此,构造建模约束地震反演技术能够降低反演的不确定性,对油田后续开发调整具有重要意义。

关键词:河道砂; 剩余油分布; 地震反演; 构造建模; 储层预测; 萨尔图油田; 大庆

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Structure modeling-constrained seismic inversion technology

——a case study from Nanba area in Saertu oilfield, Daqing

Li Zhandong¹, Li Ji¹, Li Yang², Chen Dayou³, Zhao Wei⁴

[1. College of Petroleum Engineering Institute, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Daqing Vocational College, Daqing, Heilongjiang 163255, China; 3. PetroChina International (PK) Ltd. Company, Kyzylorda 120001, Kazakhstan; 4. The Sixth Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163114, China]

Abstract: This paper introduces structure modeling-constrained seismic inversion technique. It has four key components, i. e. well-seismic integrated small scale structure interpretation, rational design of geologic framework, multi-scale grid design and curve homogenization. Take SⅡ7-12 sedimentary units in Nanba area of Daqing Saertu oilfield as an example, the article summarizes the advantages of structure modeling-constrained seismic inversion over seismic inversion without structure modeling. ①It can improve the accuracy of sandbody identification, especially channel sand and realize well-seismic integrated correction of sedimentary microfacies through “defining facies in wells and shapes on slices”; ②It can reveal the contact relationship between major thick reservoir and the main sand body, and refine the prediction of sandbodies near faults, so as to guide remaining oil potential tapping. It is concluded that structure modeling-constrained seismic inversion can lower the uncertainty of seismic inversion and is of great significance to oilfield development adjustment in later stage.

Key words: channel sand, remaining oil distribution, seismic inversion, structure modeling, reservoir prediction, Saertu oilfield, Daqing area

反演作为储层预测的有效手段得到了广泛的认可,尤其是近几年来油藏地球物理技术在油藏工程中的应用,实现了反演由油田勘探、评价研究领域向油田

深度开发阶段延伸^[1],国内学者在此积累了丰富经验^[2-9]。随着油田开发程度的提高,对地下地质体研究的目标、尺度的要求亦随之提高,此时急需引入更多

收稿日期:2013-02-22; 修订日期:2013-05-06。

第一作者简介:李占东(1979—),男,博士、副教授,油藏描述与油田开发。

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(SS2012AA060203)。E-mail:13644593771@163.com。

的先验知识,如地质体规模、构造建模等因素约束反演,尤其是高精度构造模型对反演的约束作用,以此实现高精度储层预测的要求。开展构造建模约束反演,可以增加反演细节,降低反演因为插值收敛等带来的不确定性,尤其对于特高含水油田,提高模型精确度对完善井组注采关系和重构地下储层认识具有重要的意义。

1 构造建模约束反演的作用

1.1 在低频模型中的应用

地质模型在反演中扮演着重要角色^[10]。首先,为波阻抗反演提供与地质构造相一致的低频分量模型;其次,建立层位接触关系的信息并为其其他功能函数提供层位限定格架,确保井曲线和解释层位匹配、合成地震记录和地震数据匹配、通过构造模型约束条件,使井间的权重分布遵从地震数据、构造模型的变化,从而根据参数模型中的权重分布、层位、地层接触关系等产生真实的低频模型。①低频模型的约束层应与地质分层界限相一致,使层位插值结果忠实于井点小层数据,这样既保证插值的小层面和井数据完全一致,同时还起到改善断层和层位交切关系、提高网格化精度和尺度的作用;②在地震解释数据与时-深转换的测井曲线数据完全对应的基础上,构造模型的引入确保反演初始模型的插值是以小层或微层为单元,通过距离与权重系数控制井曲线插值来创建储层模型,从而达到地质体形态与测井数据和地震数据具有高度的一致性。

1.2 在确定性反演过程中的应用

确定性反演的实现过程,构建合理的地质模型非常重要。确定性反演主要采用基于模型的测井约束地震反演方法,构造建模则提供了反演的基本地质格架模型,建立可用于确定性反演的低频模型。在建立地质模型时,不仅要处理复杂的地质沉积条件和复杂断裂结构,而且,可以应用地震处理速度场作为确定性反演趋势约束,地震层速度作为辅助变量用来指导井点波阻抗曲线的平面插值,创建的低频模型能使反演结果对于构造和岩性刻画细节更丰富,可用性更高。

1.3 在多个实现模拟过程中的应用

多个实现模拟反演过程也可归类为不确定性反演,其主要目的是识别薄储层,提高反演预测精度。多个实现反演中应用构造建模的目的是利用地下复杂构

造信息来约束储层预测平面的多解性和随机性。在多个实现模拟过程中,构造层间趋势面能够对目的层储层横向的展布起到约束作用,除将精细的构造模型赋予到储层反演之中外,断层参与还能够明确砂体切割情况。砂体错断除受断裂断距大小影响外,还受断裂性质影响,如同沉积断裂两侧通常断层上盘砂体发育,晚期断裂影响砂体连通情况等。随着对构造建模在储层反演约束中作用认识的提高,使得储层反演指导剩余油挖潜成为可能。

2 构造建模在地震反演与地质建模中的区别

2.1 作用不同

构造建模是三维地质建模的基础,并为后续的属性建模提供三维骨架^[11]。构造建模在地震反演中不仅提供三维骨架的作用,而且可以生成低频模型补偿地震反演低频分量,拓宽地震反演频带,从而为后期精细描述储层和岩性奠定了基础。

2.2 过程领域不同

构造建模在地质模型实现过程中主要依据井数据资料进行插值和模拟,整个过程是深度域实现的;而构造建模在反演以合成地震记录为基础,地震数据(层位解释、断层解释、地震数据体等)和井数据结合开展的模拟运算,整个过程既可以是时间域的,也可以是深度域的。

2.3 油藏意义不同

构造建模作为地质模型一个重要环节,主要是对后续沉积微相模型及物性模型的建立有着极为重要的意义,其直接影响后续数值模拟和剩余油的精度。构造建模约束地震反演是对储层和岩性预测引入更为丰富的信息,其结果更集中于预测砂体展布和储层沉积等,对宏观剩余油预测提供依据。

3 构造建模约束地震反演关键环节

3.1 井-震联合小尺度构造解释

一个成功的构造模型的关键是首先要有一个高精度的井震统一框架。因此,需要针对小尺度地质体开展精细构造解释,从而使地质分层与层位解释形成高度吻合,实践得知,采用构造趋势面法进行层间小层空间插值解释效果较好(图1a)。具体流程为:①网格化测井分层小层厚度 H_1 (m) 和油层组地层厚度 H (m),

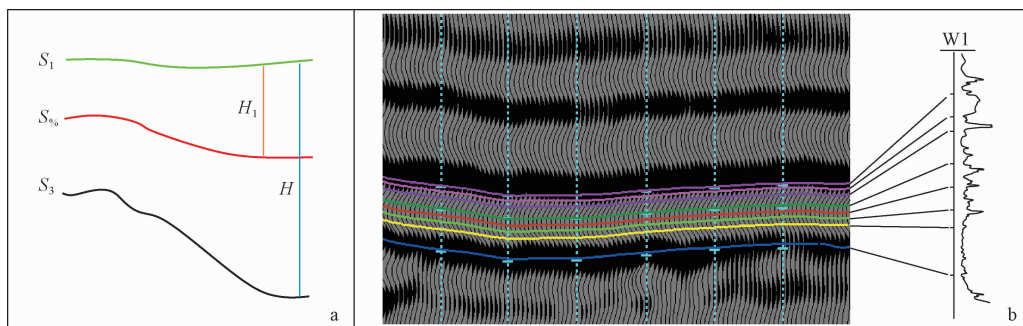


图1 构造趋势面分析法层间地震解释

Fig. 1 Sketch diagram showing interlayer seismic interpretation based on the structure trend method

a. 构造趋势面分析法示意图; b. 井-震联合小尺度构造解释

二者相除得到小层所占厚度的百分比 $H_{\%}$ (%) (即 $H_{\%} = H_1/H$); ②对油层组顶、底解释结果 S_1 (ms) 和 S_3 (ms) 相减得到油层组时间厚度差 ΔS (ms), 并网格化; ③由于开发层系薄、尺度小, 地质小层构造起伏在地震表现层间起伏是一一对应的, 即地层厚度百分比 $H_{\%}$ 与时间厚度百分比 $S_{\%}$ (%) 趋势一致, 因此:

$$S_x = S_1 + \Delta S \times S_{\%} \quad (1)$$

式(1)等同于:

$$S_x = S_1 + \Delta S \times H_{\%} \quad (2)$$

式中: S_x 为所求层间层位, ms。即得到某一层间解释层位。重复上述操作则可完成层间层位解释(图1b)。

3.2 合理设计地质框架

为了明确断层在平面和空间的组合关系, 需要了解目标区的断裂发育史、演化史等特征, 需处理断层的接触关系以及断层与层位间接触关系。在搭建地质框架时应遵循如下原则: ①断裂系统发育史和演化史要明确, 早期断层不能切割晚期断层, 同生断层下降盘厚度大于上升盘地层厚度。②主、从断层要分清, 主断层不允许被剪切。③断层间的接触关系一定要清晰, 主要包括层间平行整合关系和平行不整合接触, 其中, 平行不整合接触又可进一步细分上超、下超、顶超、削截等复杂接触关系, 根据这些地质概念确定断层和层位是否相交或切割等。

3.3 不同尺度网格设计

为了实现一系列在纵向和横向上都与井资料、地震资料和地质约束符合的高精度构造模型, 需要设计不同尺度网格参数^[12-13]。地质模型单元格的横向长度一般远远大于地震网格的线道距, 通常与目标体如河道横向最大走向有关。构造模型纵向几何采样取决于所要识别地质体最小厚度, 一般稍大于或等于地震数据体纵向采样间隔, 过高的纵向几何采样会导致采

样结果出现属性窜层, 构造越复杂, 层段厚度越小, 比如一个很薄的高渗透性夹层, 几何采样的畸变就越剧烈。因此, 合理纵向几何采样能够保证时深转换的精确性, 从而保留重要流体单元。

3.4 曲线均一化处理

测井曲线预处理是地震反演成败的关键步骤之一^[14-16]。通常曲线预处理工作主要集中于曲线标准化工作, 往往忽视了曲线均一化工作。众所周知, 当砂岩含钙时曲线通常表现为异常突变, 尤其是电阻率曲线表现为异常高值, 这种异常值若不处理, 往往会干扰反演结果, 从而影响了储层预测的精度^[17]。统计表明, 自然电位和电阻率曲线在区分岩性、判别含油程度上有明显优势, 而声波曲线对砂泥岩识别精度较差, 但可以做为时深转化的载体完成地震反演。进行测井数据标准化处理时, 需要对测井、地质等资料进行精细分析, 选择测井响应具有一致性的稳定的泥岩段作为该套标准化处理的标志层段^[18-19], 然后对每口井的测井曲线进行频率直方图统计, 统计出该段的最大值和最小值, 将所有的井按照某一标准井的曲线, 将目的层段收缩到相同的范围之内, 即将其量纲校正到统一标准。

$$X_0 = \frac{(X_{\text{标准}}^{\max} - X_{\text{标准}}^{\min})(X - X_{\text{本井}}^{\min})}{X_{\text{本井}}^{\max} - X_{\text{本井}}^{\min}} + X_{\text{标准}}^{\min} \quad (3)$$

式中: $X_{\text{标准}}^{\min}$ 和 $X_{\text{标准}}^{\max}$ 为标准井曲线的最小值和最大值; $X_{\text{本井}}^{\min}$ 和 $X_{\text{本井}}^{\max}$ 为校正井曲线的最小值和最大值; X 为某深度对应的值; X_0 为均一化后的曲线值。

4 实例研究

南八西区位于大庆长垣萨尔图油田南部, 包含油气区和东侧过渡带面积 7.5 km², 构造起伏较缓, 为一向西倾伏的单斜构造。区内开发地震资料分辨率较高, 中浅层地震资料主频 45 ~ 50 Hz, 面元密度为 10 m ×

10 m。现开发投产井 271 口,先后部署了基础井、一次加密井、二次加密井和三次加密井等多套井网。纵向上油层众多,自下而上含油层位主要为高台子油层、葡萄花油层、萨尔图油层^[2],其中萨尔图油层是主要储层和含油层位,断层较发育,断裂以北东走向为主,兼发育北西向断层。本文以萨Ⅱ7-12 单元为例,重点阐述了相同地震反演方法条件下构造建模约束前后地震反演对储层认识的影响。

多解性是基于模型地震反演的固有特性,而建立尽可能接近实际地层情况的波阻抗模型,是减少其多解性的根本途径。初始模型的横向分辨率取决于地震

层位解释的精细程度,纵向分辨率受到地震采样率的限制。为了能较多地保留测井的高频信息,反映薄层的变化细节,笔者对地震数据进行了 1 ms 加密采样,层位精细到小层单元级,即萨Ⅱ7-12 共计 10 个单元(图 2)。从建立的初始波阻抗模型可看出(图 3),井的波阻抗变化符合地质规律,断层的空间变化以及断层两盘地层的接触关系合理,与地震剖面吻合较好,剖面形态符合地质规律。

构造建模约束地震反演效果非常显著。①提高砂泥岩薄互层条件下识别薄层砂的精度。图 4 展示了构造建模约束前后反演剖面对比,总体上,两者在预测砂

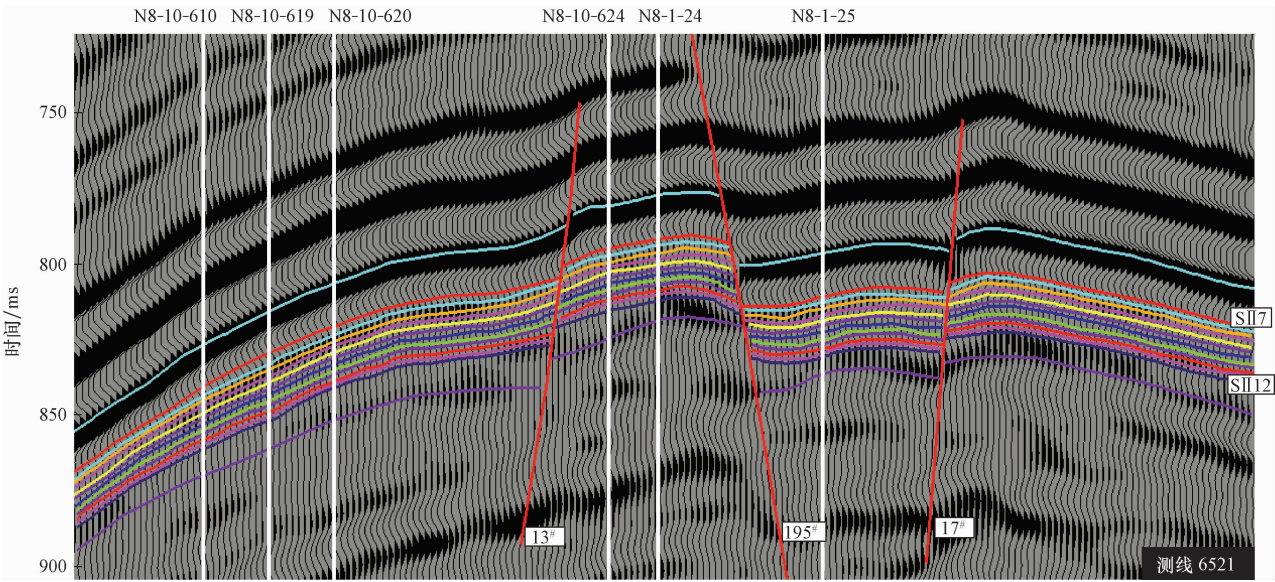


图 2 萨尔图油田南八区萨Ⅱ7-12 沉积单元地震解释剖面
Fig. 2 Seismic profile of S II 7-12 sedimentary unit of Nanba area in Saertu oilfield

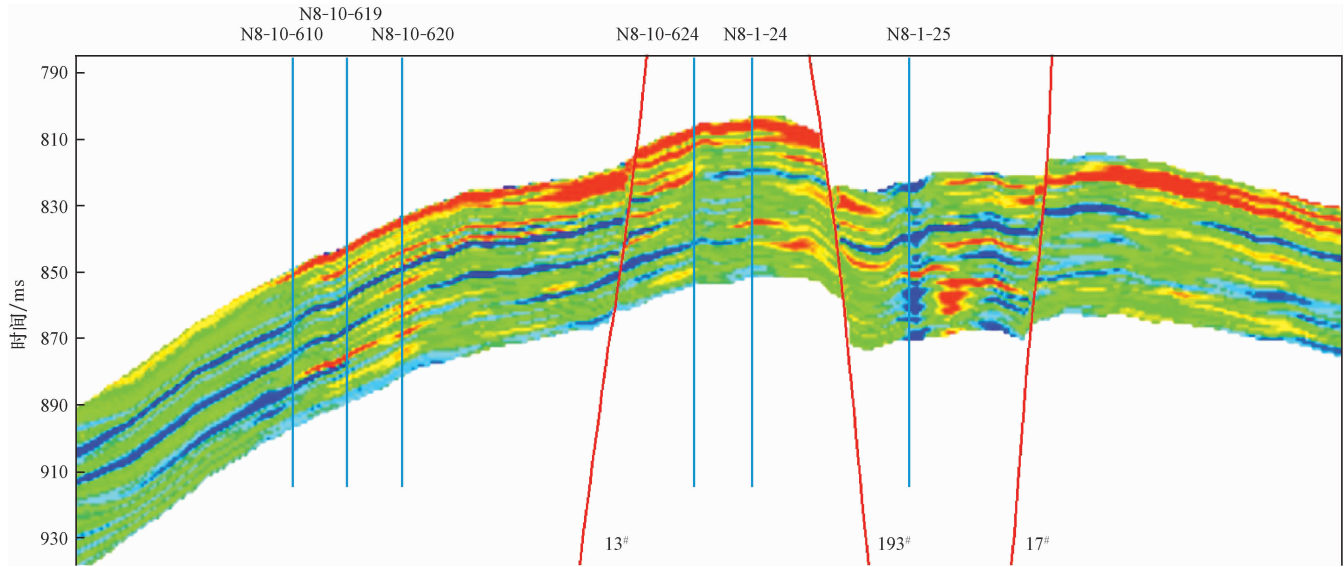


图 3 萨尔图油田南八区萨Ⅱ7-12 沉积单元初始模型
Fig. 3 Initial model of S II 7-12 sedimentary unit of Nanba area in Saertu oilfield

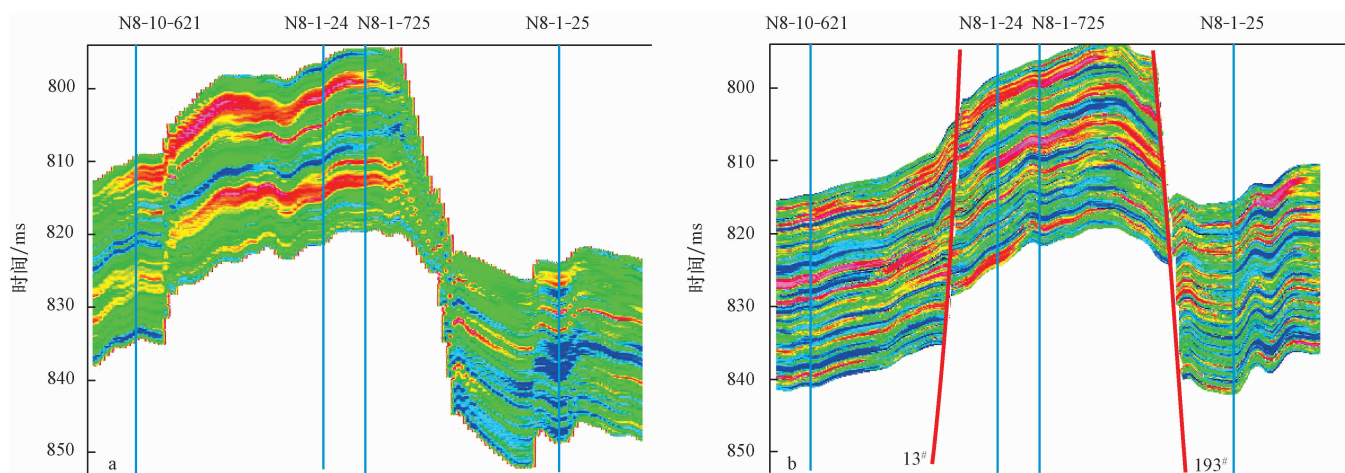


图4 构造建模约束地震反演前后效果对比(6521测线)

Fig. 4 Comparison of seismic inversion results before and after structure modeling being taken as a constraint

a. 未参与构造建模过井反演剖面; b. 构造建模约束反演过井反演剖面

岩分布十分相似,但构造建模约束后地震反演分辨率有所提高,除能够识别大于3 m砂岩外,还能够识别2 m左右薄砂岩,如N8-10-619与N8-10-620井之间识别出3-4套薄层砂。②构造建模约束地震反演能够增加断层附近预测的细节,断裂带附近砂体发育明朗化。以N8-1-24和N8-1-725井间砂体预测为例,该两口井位于13°和195°断层之间,对比构造建模约束反演剖面在断层两侧发育情况可知,构造建模未参与的反演剖面在断层两侧砂岩发育情况不明显(图4a,b),尤其在195°断层附近砂体效果不好,而构造建模约束的反演剖面则表现出断层两侧砂岩发育较好,在195°断层下盘附近发育多个上倾尖灭砂体以及透镜状砂体,受195°断层遮挡作用,在该断层下盘与N8-1-24井之间仍有一定的滞油区,形成了典型的断层遮挡型剩余油^[20]。

构造建模约束地震反演能够提高砂泥岩薄互层条件下砂体的准确程度,与未约束地震反演相比,构造建模约束地震反演提供了一个优势较大的分析手段^[21-22]。首先,准确定位沉积单元内河道砂边界位置,尤其解决河道砂连续性、组合等问题效果较好;其次,明确了较厚的主力油层及主力砂体接触关系,尤其是断裂两侧砂体分布情况,从而影响了后期剩余油挖潜和结构调整^[23-24]。研究表明,构造建模约束地震反演同时受到井、震两种数据的约束,既符合井数据的地质统计学特征,同时又能反映出在地震数据中观测到的大尺度结构和储层连续性^[25]。就储层预测精度而言,以萨II8a沉积单元为例,原沉积微相单纯依靠测井资料预测井间砂体分布,由于缺乏地

震横向资料精度较低,河道砂呈坨状或甜点状分布,预测的可靠性较差(图5a)。采用“井点定相、切片组形”的方法,借助反演属性切片和反演剖面可以看出(图5b),砂体受北东向断裂切割明显,而对于北西向断层切割作用不明显,同样证明了断层两侧存在未动用剩余油(图5c)。修正后沉积相河道连续性较好,河道走向以南北向为主,兼发育北西向和北东向分支河道。

5 结论

1) 采用构造建模约束地震反演可以增加反演细节,降低反演因为插值收敛等带来的不确定性,通过井震联合小尺度构造解释、合理设计地质框架、不同尺度网格设计等各个关键环节,既符合井数据的地质统计学特征,同时又能反映出构造建模约束反演所体现不同尺度储层发育特征,有效地降低了随机反演的不确定性。

2) 构造约束地震反演技术能够增加随机模拟反演中的确定性因素,提高反演预测的精度,纵向上能够识别2 m左右薄砂岩。同时,准确定位河道砂体的边界及砂体的接触关系,这对井间沉积微相的预测非常重要。

3) 实践证明,构造建模约束反演技术实现了在纵向和横向上井震资料和地质约束相符合的高精度反演体,尤其是对断裂两侧砂体预测效果明显,这对静态剩余油的描述和油田的二次开发与调整具有重要的意义。

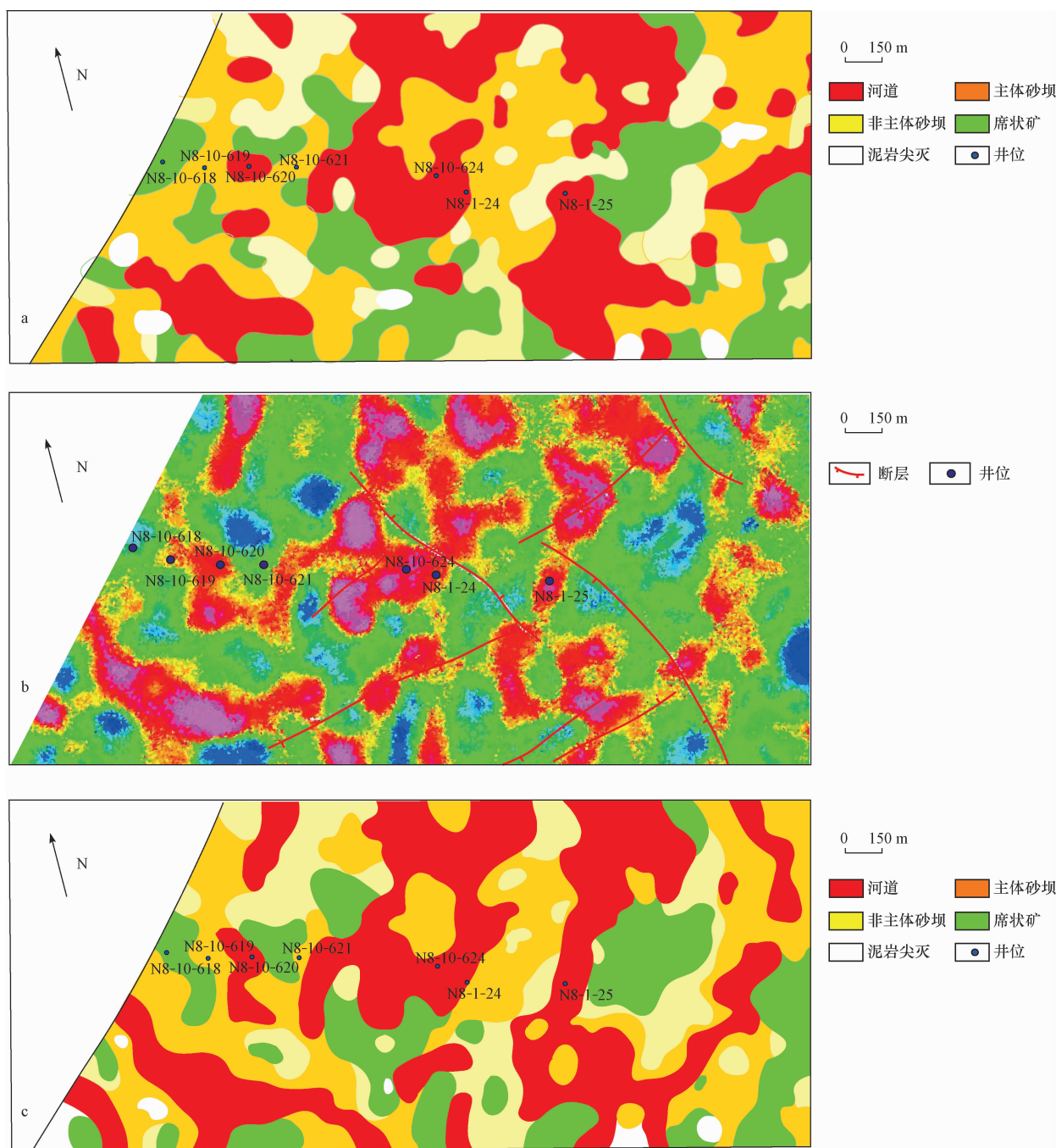


图5 萨尔图油田南八区萨II 8a沉积单元井-震联合对比

Fig.5 Well-seismic integrated sedimentary facies correction of S II 8a sedimentary unit in Nanba area, Saertu oilfield

a. 基于测井沉积相;b. 构造建模约束下反演切片;c. 井-震联合沉积相修正

参 考 文 献

- [1] 刘文岭,韩大匡,胡水清,等. 高含水油田发展油藏地球物理技术的思考与实践[J]. 石油学报,2009,30(4):550-559.
Liu Wenling, Han Dakuang, Hu Shuiqing, et al. Consideration and practice of reservoir geophysics techniques in development of mature oilfields with high water cut[J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):550-559.
- [2] 李军,熊利平,赵为永,等. 基于确定性和随机模型的薄储层岩性预测[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):240-244.
Li Jun, Xiong Liping, Zhao Weiyong, et al. Lithology prediction of thin reservoirs based on deterministic and stochastic models[J]. Oil & Gas Geology,2009,30(2):240-244.
- [3] 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,2011,54(32):797-806.
Li Zhandong, Zhao Wei, Li Yang, et al. The Feasibility Study and application of development Seismic Inversion—a case study from northern Changyuan oilfield of Daqing area[J]. Oil & Gas Geology, 2011,54(32):797-806.
- [4] 胡华锋,印兴耀,吴国忱. 基于贝叶斯分类的储层物性参数联合反演方法[J]. 石油物探,2012,51(3):225-232.
Hu Huafeng, Yin Xingyao, Wu Guochen. Joint inversion of petrophysical parameters based on Bayesian classification[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2012,51(3):225-232.
- [5] 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.
- [6] 李国发, 岳英, 国春香, 等. 基于模型的薄互层地震属性分析及其应用[J]. 石油物探, 2011, 50(2): 144-149.
- Li Guofa, Yue Ying, Guo Chunxiang, et al. Seismic attributes analysis based on model in thin interbedded layers and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2): 144-149.
- [7] 张菲, 孙培安, 张乐. 高分辨率阵列感应测井在薄层评价中的应用[J]. 石油实验地质, 2012, 34(5): 510-513.
- Zhang Fei, Sun Peian, Zhang Le. Application of high resolution array induction logging in thin bed evaluation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(5): 510-513.
- [8] 潘昱洁, 李大卫, 杨锴. 确定性反演和随机反演对井约束条件的需求分析[J]. 石油物探, 2011, 50(4): 345-349, 360.
- Pan Yujie, Li Dawei, Yang Kai. A comparison between the requirements of multi-well constrained conditions in deterministic inversion and stochastic inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(4): 345-349, 360.
- [9] 叶泰然, 付顺, 吕其彪, 等. 多波地震联合反演预测相对优质储层——以川西深层致密碎屑砂岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 357-362.
- Ye Tairan, Fu Shun, Lü Qibiao, et al. Application of multiwave joint inversion to the prediction of relatively high-quality reservoirs—an example from the prediction of deep tight clastic sandstone reservoirs in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 357-362.
- [10] 唐湘蓉, 蔡涵鹏, 贺振华. 地震波高频信息在薄层砂体预测中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(3): 244-250, 279.
- Tang Xiangrong, Cai Hanpeng, He Zhenhua. Thin-bed sand body prediction based on seismic wave high-frequency information[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(3): 244-250, 279.
- [11] 邹起阳, 阎振华, 徐阳东, 等. 应用 Petrel 进行构造建模的研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(2): 62-64.
- Zhou Qiyang, Yan Zhenhua, Xu Yangdong, et al. Structure modeling using Petrel software[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(2): 62-64.
- [12] 夏吉庄. 多尺度资料匹配构造建模技术及应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010, 32(4): 257-260.
- Xia Jizhuang. The technology and application of structure model matched by multi-scale data[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(4): 257-260.
- [13] 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 64-68.
- Liu Wenling. Geological modeling technique for reservoir constrained by seismic data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 64-68.
- [14] 王琦, 李红梅. 开发地震在大庆长垣喇嘛甸油田储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 490-496.
- Wang Qi, Li Hongmei. Application of development seismology to reservoir prediction of Lamadian oilfield in Daqing Placanticline[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 490-496.
- [15] 段云卿, 王彦春, 覃天, 等. 储层地震反演在辽河油田大民屯凹陷的应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(4): 554-558.
- Duan Yunqing, Wang Yanchun, Qin Tian, et al. Application of reservoir seismic inversion at damintun sag in Liaohe oilfield[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(4): 554-558.
- [16] 孙素琴, 杨玉杰. 塔里木盆地顺西区块地震反演及储层预测[J]. 石油物探, 2012, 51(3): 304-311.
- Sun Suqin, Yang Yujie. Seismic inversion and reservoir prediction of Shunxi block in Tarim Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(3): 304-311.
- [17] 许杰, 董宁, 朱成宏, 等. 致密砂岩地震预测在水平井轨迹设计中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 909-913.
- Xu Jie, Dong Ning, Zhu Chenghong, et al. Application of seismic data to the design of horizontal well trajectory in tight sandstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 909-913.
- [18] 魏水建, 冯琼, 冯寅, 等. 川东北通南巴地区三叠系膏盐岩盖层预测[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 81-86.
- Wei Shuijian, Feng Qiong, Feng Yin, et al. Prediction of Triassic gypsum cap rocks in Tongnanba region of Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 81-86.
- [19] 李慧勇, 徐长贵, 刘廷海, 等. 陆相盆地薄层泥岩盖层形成机制、特征与油气成藏关系——以辽东湾地区中南部为例[J]. 石油实验地质, 2010, 32(1): 19-23.
- Li Huiyong, Xu Changgui, Liu Tinghai, et al. The formation mechanisms and characteristics of thin layer mudstone caprock and its relationship with hydrocarbon accumulation in the terrestrial basin—an example of thin-layer mudstone caprock in the south-central Liaodong Bay[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(1): 19-23.
- [20] 计秉玉. 国内外油田提高采收率技术进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 111-117.
- Ji Bingyu. Progress and prospects of enhanced oil recovery technologies at home and abroad[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 111-117.
- [21] 孙素琴. 大牛地气田二叠系山西组单砂体预测技术及应用[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 340-344.
- Sun Suqin. Prediction of single sand body and its application in Shanxi Formation of Permian, Daniudi Gas Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 340-344.
- [22] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583-591.
- Han Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583-591.
- [23] 陈汉军, 叶泰然, 郭伟, 等. 云南曲靖盆地浅层气藏地震储层预测及勘探前景分析[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 207-213.
- Chen Hanjun, Ye Tairan, Guo Wei, et al. Seismic reservoir prediction and exploration prospect analysis of shallow gas reservoirs in the Qujing Basin, Yunnan province[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 207-213.
- [24] 张兆辉, 苏明军, 刘化清, 等. 精细地震层序地层分析技术及应用——以渤海湾盆地歧口凹陷滨海地区为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(6): 648-652.
- Zhang Zhaohui, Su Mingjun, Liu Huaqing, et al. High precision analysis technology of seismic sequence strata and its application: a case study of Binhai region in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(6): 648-652.
- [25] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 73-78.
- Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 73-78.