

文章编号:0253-9985(2011)04-797-10

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

李占东¹, 赵伟², 李阳³, 彭政⁴, 张海翔⁵

- (1. 东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 大庆油田有限责任公司 第六采油厂, 黑龙江 大庆 163114; 3. 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; 4. 中国石油 大庆油田有限责任公司 第二采油厂, 黑龙江 大庆 163414; 5. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:为解决开发地震反演可行性和精细储层刻画的难题,提出了一种基于分频补偿的曲线重构方法。根据测井曲线不同频率尺度反映不同砂岩特征的特点,利用高频恢复、低频补偿方法重构“拟波阻抗”曲线。反演可行性分析实验表明,通过曲线重构反演、模拟退火算法引入以及密井网反演等关键技术,能够加强结果稳定性的优化,提高薄储层预测精度;同时,正演模拟和反演实践证明,在大套泥岩中含有薄砂层的地质条件下,开发地震对刻画2 m薄层砂岩是可行的。而对于小于2 m以下的薄砂层,仅当泥岩围岩在2 m以上的泥包砂型薄砂层能够进行分辨。井-震联合沉积相研究主要修正了河道侧积体识别、河道连通关系、河道规模变化、河道组合关系和河道期次划分等5个方面。规模较大的分流河道含油性好,形成较好的注采不完善型剩余油;小型分流河道局部含油性好,但河道窄小,以井网控制不住型剩余油为主。

关键词:模拟退火;井-震联合;多期河道;开发地震反演;大庆长垣

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Feasibility study and application of development seismic inversion

—a case study from northern Changyuan oilfield of Daqing area

Li Zhandong¹, Zhao Wei², Li Yang³, Peng Zheng⁴ and Zhang Haixiang⁵

- (1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. The Sixth Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163114, China; 3. The First Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163257, China; 4. The Second Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163414, China; 5. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: In order to make development seismic inversion and fine reservoir description feasible, we proposed a curve reconstruction method based on frequency division compensation. As logs with different frequency can reflect features of different sandstones, we reconstructed “quasi-wave impedance” curves through high frequency restoration and low frequency compensation. Inversion feasibility analysis experiments showed that result stability could be optimized and reservoir prediction accuracy could be improved through introducing curve reconstruction inversion, simulated annealing algorithm and high well-dense inversion. Meanwhile, forward modeling and inversion proved that 2 meters thin sandstone layer interbedded in thick mudstone could be recognized through development seismic inversion. But for sandstone layers with thickness less than 2 meters, they can be recognized only when interbedded within mudstone layers greater than 2 meters thick. Well-tied seismic sedimentary facies study was also carried out to refine prediction of sandbody volume on sides of channel, channel sand connectivity,

收稿日期:2010-12-20。

第一作者简介:李占东(1979—),男,博士,层序地层学与沉积储层地质学。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司“十一五”超前科研项目;教育部博士点基金项目(20050220001)。

channel sand scale change, channel combination and timing of channels. Large distributary channel sandbodies are high in oil potential and remaining oil is commonly caused by imperfect injection-production well pattern. Small distributary channel sandbodies locally have high oil potential, and remaining oil is commonly caused by limited control area of well patterns.

Key words: simulate anneal, well-tied seismic inversion, multi-stage channel, development seismic inversion, Changyuan oilfield of Daqing area

反演在储层预测应用中已经成为国际石油界一项重要的方法和技术,最近国内学者在该领域积累了丰富经验^[1-4]。地震反演在理论阐述、算法改进、实例应用等方面的文献较多,而对大庆长垣密井区的开发地震反演报道几乎没有。大庆长垣目前储层地质研究现已无法满足油田开发的要求,其面临主要矛盾如下:①单纯依靠测井资料预测井间砂体精度较低,需要通过开发地震准确预测井间砂体分布,挖潜剩余油潜力;②过渡带边部井控程度低,需要通过开发地震寻找扩边潜力。自长垣喇嘛甸油田和萨尔图油田完成三维地震采集工作以来,开发地震储层研究揭开了序幕。随着工作研究的深入,长垣开发地震工作现面临巨大的挑战。其一,密井网地震反演可行性如何?

其二,砂泥岩互层井间薄砂层预测,尤其是 2m 左右薄层砂体识别能否实现?为此,笔者在研究、借鉴前人研究成果的基础上,以大庆长垣北部萨尔图油田的开发地震反演为例,系统阐述了开发地震反演的可行性研究及其在油田中的应用,为后续加快老油田剩余油的挖潜奠定了基础。

1 地质概况

大庆长垣北部自北向南包括喇嘛甸和萨尔图油田(图 1),地层自北向南沉积厚度增加,油层厚度逐渐变薄,目前井网密度平均为 50 口/km²,平均井距 150 m,最小井距达 40 m。喇嘛甸油田与萨尔图油田同属一个水动力系统,油水界面深度

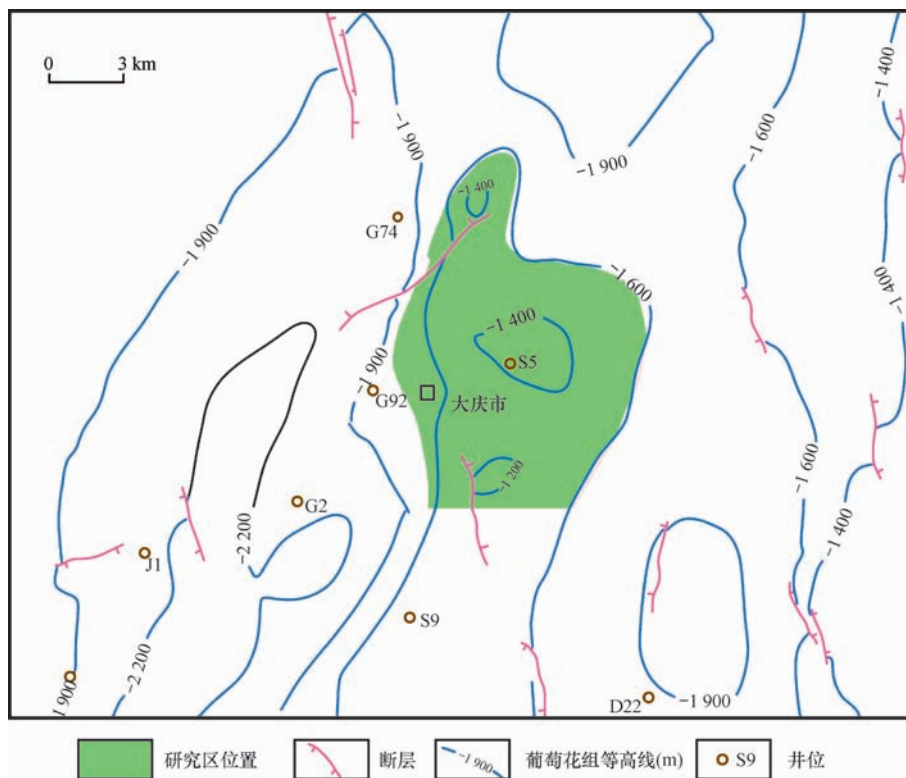


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location map of study area

受一级构造控制,分布比较规则,具有南高北低的特点。长垣北部地层以白垩系为主,自下而上划分为下白垩统火石岭组、沙河子组、营城组和泉头组,上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组等。断裂主要形成于燕山运动晚期的明水组至四方台组沉积时期,以张性断层为主,断层在浅部地层比中部地层发育,且多数为北西向和北北西向的正断层,局部发育北北东向的正断层。上白垩统为主要目的层,纵向上油层多,砂泥互层分布,隔层厚度较小,平面相变剧烈,非均质性严重,储层识别难度大。开采油层从下至上划分为高台子油层、葡萄花油层、萨尔图油层,细分10个油层组,41个砂岩组和136个小层(最多为160个沉积单元),其中萨尔图油层为含油主力层位,其厚度分布为70~100 m,储集层以粉砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩为主,属于典型的河流-三角洲相沉积砂体。

2 频率补偿原理曲线重构

2.1 问题的提出

长垣老油田在勘探开发历程中,前人在储层沉积方面做了大量的工作,而这些研究成果既不同于外围油田的模式,同时又保留了长垣油田固有的特点。实践证明,声波曲线不能有效地识别储层,需要借助电阻率、自然电位等响应特征明显的测井曲线,通过一定的数学手段和技巧重构一条反映储层地球物理特征的“拟波阻抗”曲线,因此,曲线选取成为地震反演重要的环节。经统计,自然电位曲线和电阻率曲线均对砂泥岩响应较为敏感(图2a,b),但二者又存在区别,自然电位曲线对厚砂岩响应较好,而电阻率曲线对薄砂岩响应较为敏感。为此,为了提高砂岩识别精度,突破单一因素局限性,如何融合二者优势构建“拟波阻抗”曲线成为关键。

2.2 曲线重构原理

据吴媚等^[5]“在千赫兹到百赫兹的宏观频率范围内对储层的岩石物性参数做尺度分解,进而研究在不同微观频率尺度分量上储层”这一结论得到的启示,曲线的低频分量(大尺度)对于厚砂岩响应敏感,而曲线的高频分量(小尺度)主要响

应薄砂岩的变化。因此,在相同的量纲内,把曲线作为信号分解成高低不同频率的尺度成分^[6],融合自然电位曲线低频分量和电性曲线的高频分量,从而达到了补偿低频信息,同时也恢复高频分量。具体操作如下。

定义时间域母函数

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty \text{ 的平方可积函数 } \psi(t) \text{ [即 } \psi(t) \in L^2(R) \text{]} \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为信号频谱。

对时间域母函数进行位移变换,得到函数

$$\psi_{a,b}(t) = |\omega|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (b \in R, \text{ 且 } a \neq 0) \quad (2)$$

式中: a 为尺度参数; b 为时间位移参数; t 为曲线值。

把时-深转换后的时间域连续信号(曲线) $f(t) \in L^2(R)$ 定义为

$$S_f(a,b) = |\omega|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

从能量的角度看, $S_f(a,b)$ 表示信号 $f(t)$ 时频面上以 (a,b) 函数 $f(t)$ 很小时频窗内的能谱,所以, $|S_f(a,b)|^2$ 反映的是时频域内 (a,b) 点处信号 $f(t)$ 的能量分量(高频或低频)。

曲线低频补偿或高频恢复意义为在时间域内将一维的时间函数分解为一个二维参数空间 (a,b) ,从而形成一种能在时间坐标位置 b 和尺度 a (时间周期)上具有变化的相对振幅的一种度量^[7]。

因此,自然电位曲线的低频分量与电阻率高频分量的融合(图2e,f)构建了“拟波阻抗”曲线(图2g)。为了保证重构后的曲线既能反映岩性变化,又尽量保持原有的地球物理基础,对重构曲线进行归一化处理,使重构曲线与原始波阻抗曲线隶属于同一量纲。从原始波阻抗曲线与“拟波阻抗”曲线交汇图可以看出(图2d),二者相关度较好,重构后的“拟波阻抗”曲线在岩性组合和目的层上下速度并未改变。同时,重构曲线对砂岩和泥岩的区分较之前有很大改进(图2c),尤其对薄砂岩响应非常好。

3 可行性分析试验

在完成重构曲线的基础上,为了保证反演结

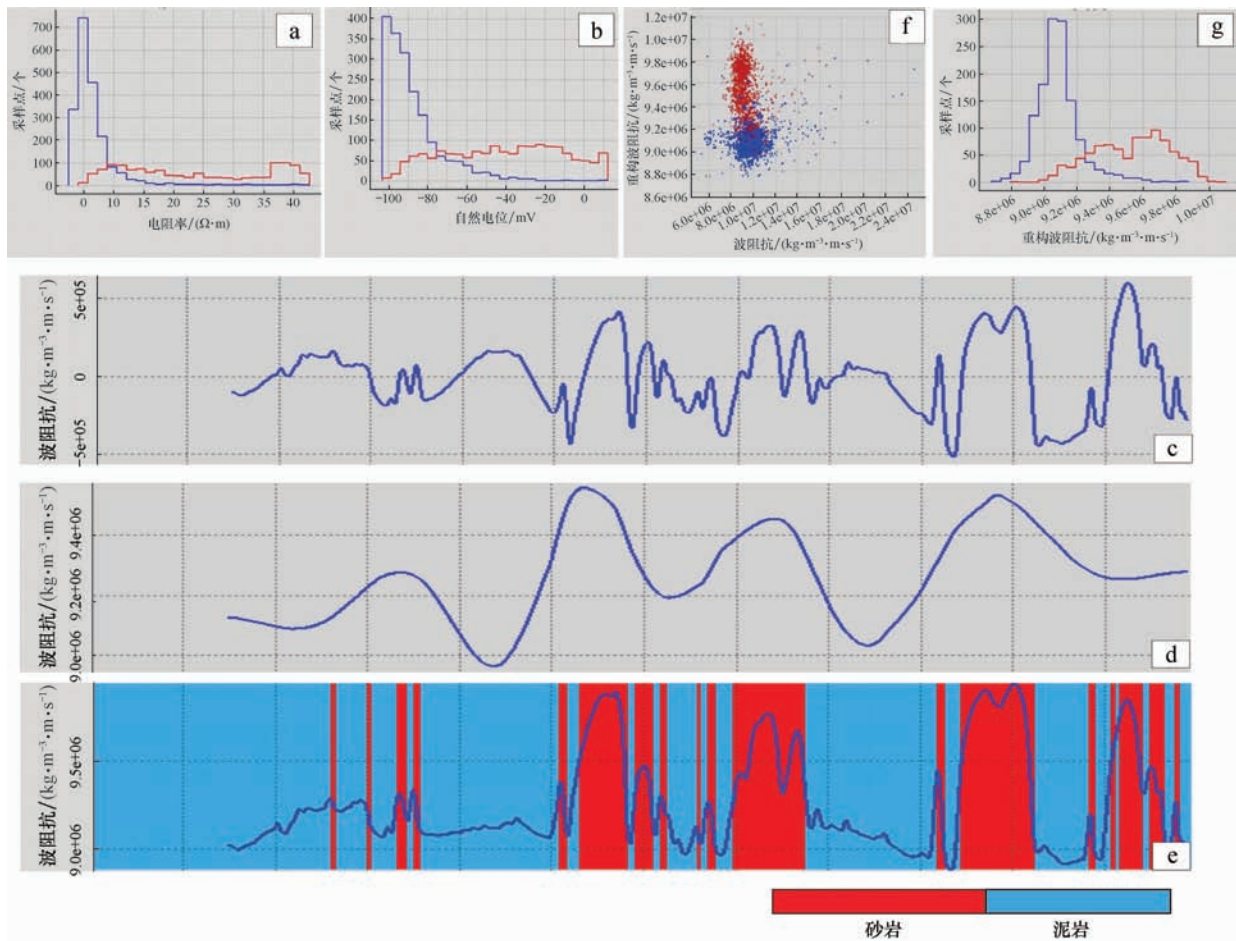


图2 频率补偿方法测井曲线重构示意图

Fig. 2 Sketch map showing curve reconstruction based on frequency division compensation

- a. 电阻率曲线岩性直方图; b. 自然电位曲线岩性直方图; c. 电阻率曲线高频分量; d. 自然电位曲线低频分量;
e. 重构后的拟波阻抗曲线; f. 重构波阻抗与原始波阻抗交汇图; g. 重构曲线岩性直方图

果可靠性,需要在实现环节上严格控制。尽管开发地震具有主频高、频带宽的特点,但地质因素、反演算法和约束条件等仍面临诸多因素的影响^[8],这些影响会导致反演结果与钻井结果相差甚远。为此,为最大程度消除反演影响因素,开展开发地震反演可行性论证。

3.1 地质因素分析

萨尔图油层自下而上划分为4个油层组,内部发育两套泥岩隔层^[9]。第一套泥岩隔层位于萨一组与萨零组之间,泥岩厚约20 m;第二套泥岩隔层略薄,位于萨二组顶部。萨零组与萨一组属下白垩统嫩江组,砂岩体分布面积较小,含油较差。萨二和萨三油层组为产油主力层,属下白垩统姚家组二、三段,砂体多为连片发育,单砂体以大于

5 m厚砂岩居多(图3)。位于两套隔层之间的萨一组是薄储层预测的难点层段,多为2 m左右薄油层,据李庆忠院士“无论从理论记录及实践结果,垂向分辨率以 $\lambda/8$ 定义更为合适,而在一些特殊的情况下,也就是大套泥岩中含有薄砂层时,垂向分辨率可以达到 $\lambda/16$ ”的结论^[10-13],萨一组地质条件具备大套泥岩中含有薄砂层的特征,因此理论上在萨一组中识别2 m的薄砂岩是可行的。

3.2 薄层砂岩分辨——正演模型设计

针对萨一组薄储层特点,设计不同频带宽度的理论模型,论证不同频率模型对反演结果的影响,频带宽度是决定反演井间薄砂层分辨率高低的主要指标^[14]。大于5 m的厚层砂岩在地震上识

别是可行的^[15],而薄砂层的识别一直以来是最为关心的问题。假设在理想情况下,分别设计主频为60 Hz和35 Hz的零相位Ricker子波正演模型(图4a,b),对比可以看出,60 Hz频带的正演模型垂向分辨近似 $\lambda/8$,而30 Hz的正演模型分辨率较低,这说明提高主频对薄砂识别精度高。因此,在开发地震主频60 Hz频带背景下,萨一组2 m薄储层识别是可行的^[16-17]。砂岩速度2 400 m/s,围岩泥岩速度2 300 m/s,薄砂厚度约2 m,当围岩(或泥岩隔层)厚度大于2 m时,仍然可以识别出薄储层,该种薄储层往往以泥包砂型薄砂为主(图4c)。

3.3 稳定性优化试验——模拟退火算法反演的引入

随机反演纵向分辨率较高^[18-19],但其结果存在不确定性和多解性,薄砂层由于随机性的影响,

剖面上砂岩边界抖动较为严重(图5a),这对于已知信息较为丰富的密井区而言,迫切需要与已知井有较高的吻合度,这无疑是需要克服的。在地球物理学中,模拟退火法的应用常与高度多解性的问题有关,这一技术可用于油气勘探和开发的多个方面^[20-21],其最为突出的优点有3个:一是可以实现油气储层的精细描述和建模,定量表征和刻画储集层各种尺度的非均质性;二是可用于定量研究储层描述的不确定性,进而降低油气勘探和开发的不确定性;三是可以综合多种来源的信息和资料,进而统一到同一个定量模型之中。因此,采用基于模拟退火算法的随机反演可大大提高反演结果的稳定性,有效约束反演随机性^[22]。模拟退火算法的随机反演不仅垂向分辨率高(图5b),同时能够优化反演效果,最大程度地增加反演稳定性。

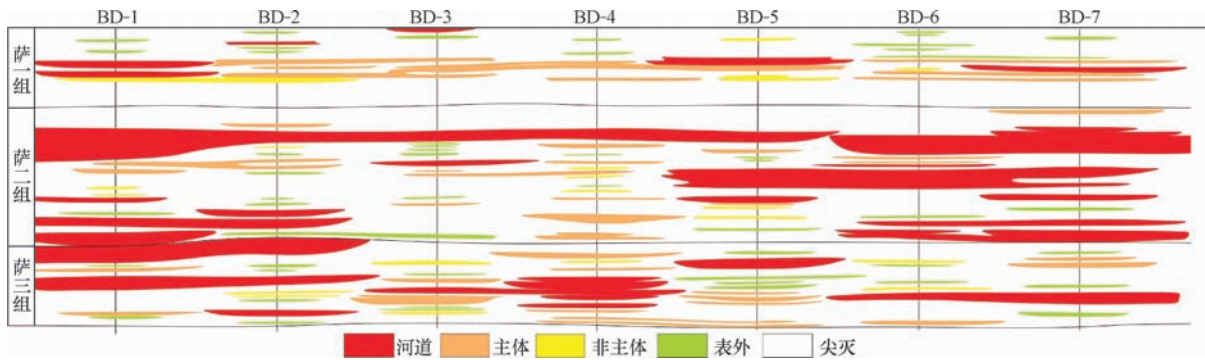


图3 喇嘛甸油田BD-1至BD-7井沉积相连井剖面

Fig. 3 Sedimentary facies profile across BD-1 to BD-7 wells in Lamadian oilfield

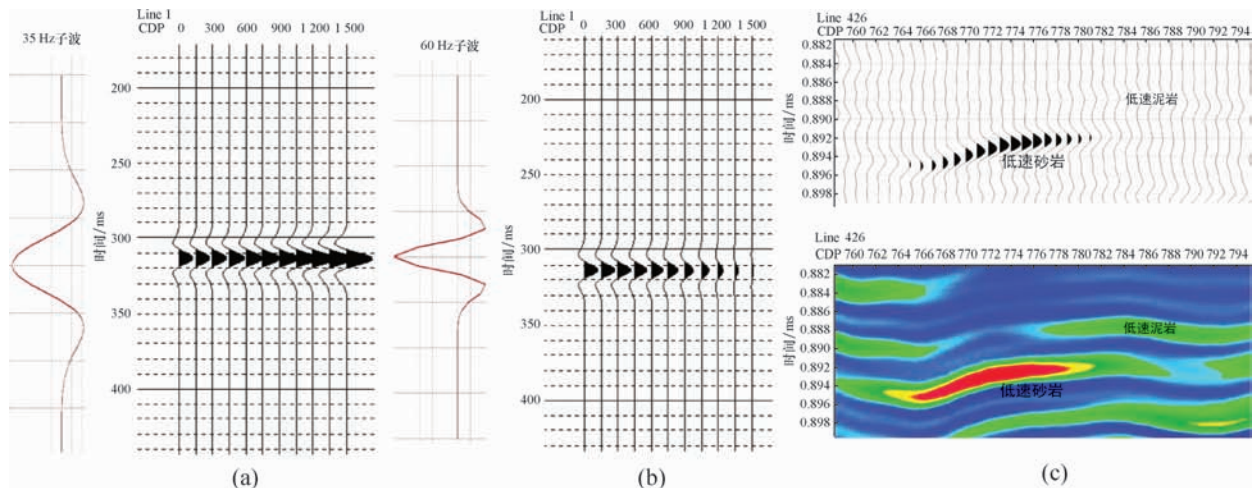


图4 不同频带宽度正演模拟

Fig. 4 Forward modeling at different frequency bandwidth

a. 35 Hz 零相位地震正演剖面; b. 60 Hz 零相位地震正演剖面; c. 60 Hz 厚度2 m 砂岩反演结果

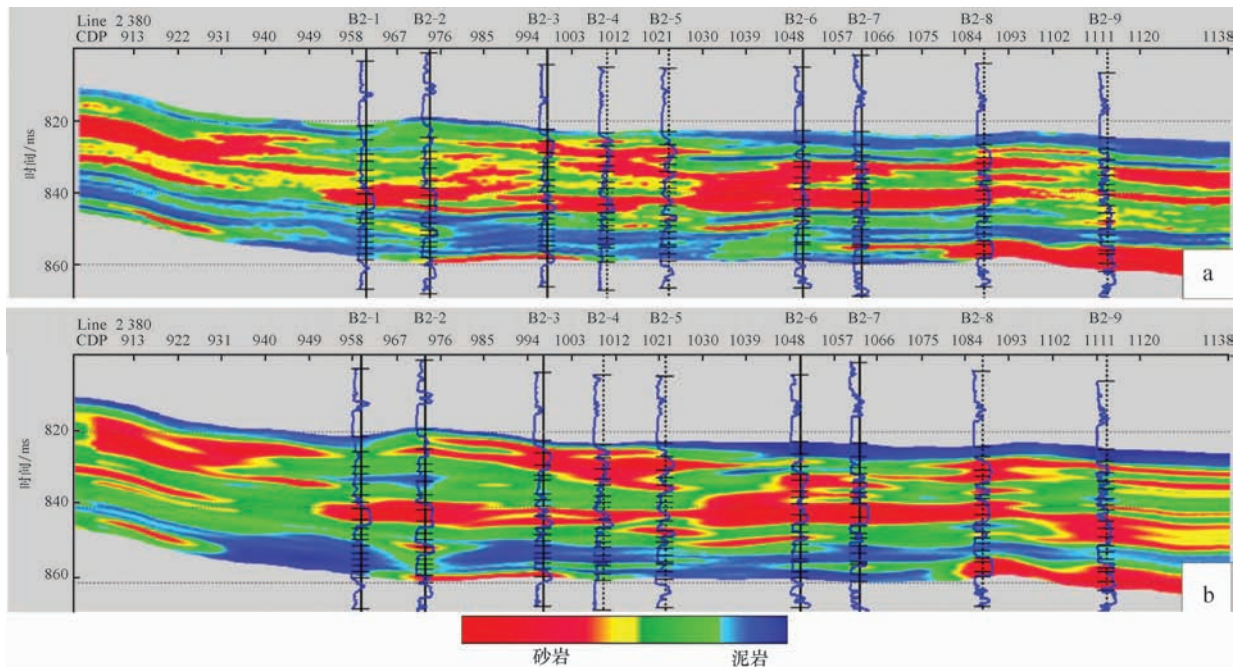


图5 开发地震反演稳定性优化试验可行性分析(萨尔图油田)

Fig. 5 Feasibility analysis of stability optimization test of development seismic inversion(Sartu oilfield)

a. 未引入模拟退火算法随机反演; b. 引入模拟退火算法后随机反演

3.4 可信度试验——抽稀井网方案验证

为了明确不同密度井网对地震反演结果可信度的影响,开展了抽稀井网反演试验。以萨北试验区为例,设计三套试验方案,方案一采用 4×4 井网(600 m井距)的井参与反演(图6a),方案二是采用 2×2 井网(300 m井距)抽稀方案(图6b),方案三是采用不抽稀井网(150 m井距)进行反演(图6c),同时把被抽稀掉的井作为后验井,作为检验结果可靠性的证据。总体上反演结果可信度较高,方案一呈现出厚层砂总体趋势反映较好,但薄层砂与后验井吻合效果不理想;方案二与方案三反演结果对比,井间薄厚砂趋于稳定,剖面上砂体发育的形态也相似,说明井距在300 m时,井间薄砂刻画效果较为明显,随着参与井的数量增加,对于识别2 m薄层砂的符合率也随之提高,其反演结果越可靠。

4 地震反演在开发地质中的效果与应用

4.1 效果描述

纵向分辨率是评价反演精度的一个重要指

标,它决定了能否精细刻画出单砂体分布状况^[23-24]。通过单砂层厚度吻合率和单井砂岩发育层个数吻合率来看,总体上随着单砂层厚度的增加,反演分辨率也随之提高,同样,随着单层砂岩厚度的增加,后验井符合率也随之增加。对于大于2 m砂岩是可以分辨的,当泥岩隔层太薄时,两套砂岩只能以一套砂岩组合形式表现出来。对于小于2 m的砂岩,尤其对小于1 m的砂岩识别率很低,后验井砂岩厚度仅占60%(图7a),单井砂岩发育层数符合率为61.1%(图7b);随着单砂岩厚度增大,反演纵向符合率也随之提高,对于2~5 m的砂岩,井上砂岩发育层数与反演剖面发育层数吻合率较好,井上砂岩发育层数和砂岩厚度与反演剖面发育层数和厚度吻合率提高到90%以上;而钻井厚度5 m以上的砂岩,井上砂岩发育层数与反演剖面发育层数吻合非常高。

4.2 井-震联合修正沉积相

原沉积相主要依靠测井资料来预测井间砂体分布,然而因砂体内部薄夹层规模很小、砂体薄厚极不稳定等因素影响,井间可对比差,需要通过地震准确预测井间砂体分布^[25]。结合钻井地质信

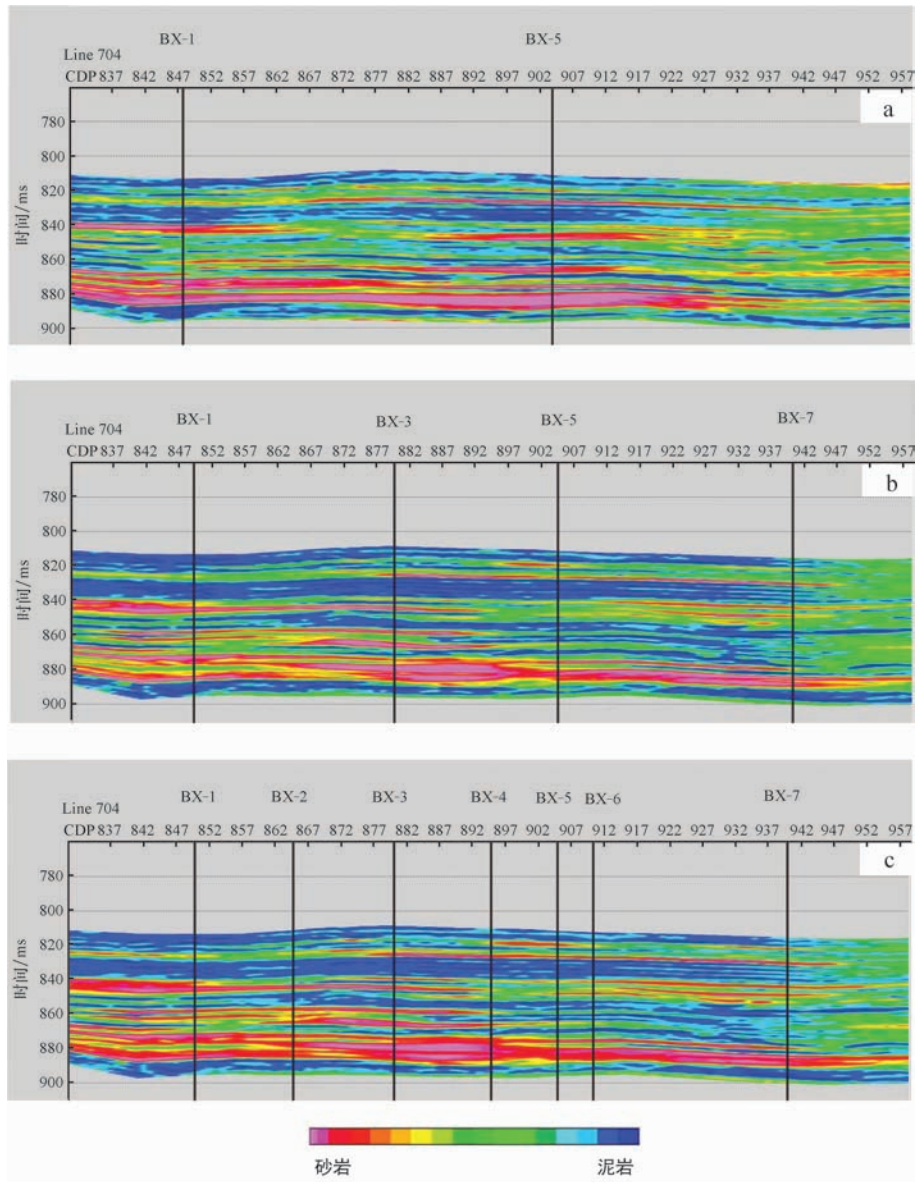


图 6 开发地震反演 3 种井网方案效果对比

Fig. 6 Comparison of development seismic inversion for three well patterns

a. 4 × 4 抽稀井网反演剖面; b. 2 × 2 抽稀井网反演剖面; c. 1 × 1 井网反演剖面

息,利用沉积单元内的地震反演切片,准确定位垂向上砂体间接触关系和空间展布,最终完成井-震联合沉积相修正。以喇嘛甸油田为例,井-震联合修正主要集中对河道沉积的落实,即河道侧积体识别、河道连通关系(由连续变为间断、由间断变为连续)修正、河道规模(宽度、延伸长度、走向)修正、河道组合变化和河道期次划分(图 8)^[26]。像分流平原等一些规模较大的河道沉积体,由于河流的不断摆动,河道砂体的沉积也不断发生变化,频繁地发生侧向迁移,再加上水流对河道砂体的

改造作用,往往会使河道砂体发生很大的变化。为了能清楚地刻画出不同沉积时期河道砂的发育情况,增加反演切片时间间隔率至 0.1 ms,确定不同期次河道的变化。多期河道切叠形成复合砂体,在自然电位曲线表现为多个叠加的钟形,连井对比曲线形态差异大且存在高程差,反演切片表现为宽带状和网状分布。因此,在多期河道划分上,利用测井曲线横向对比特征,辅助反演切片研究河道垂向演化,最终确定单期河道边界。

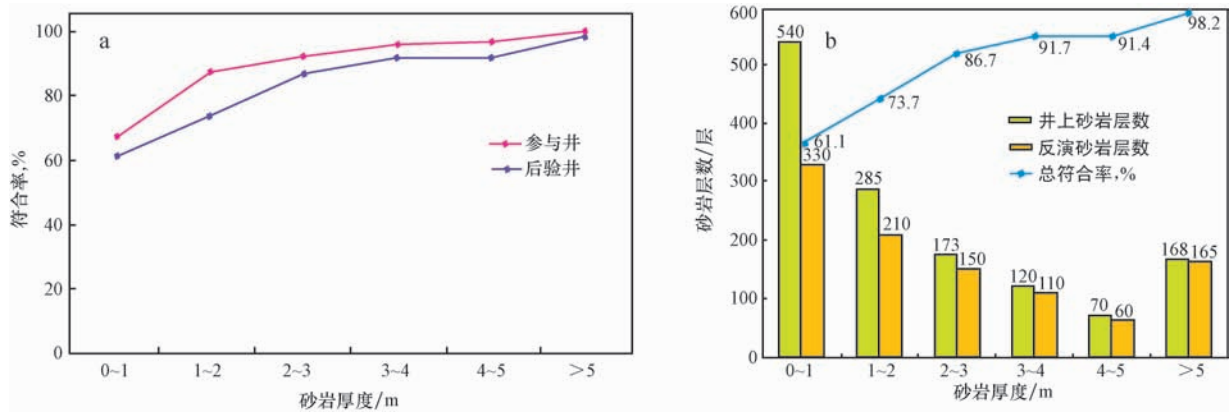


图 7 地震反演符合率统计分析

Fig. 7 Statistic analysis of coincidence rate of seismic inversion

a. 参与井与后验井单井砂岩厚度符合率; b. 参与井与后验井单井砂岩发育层数

沉积相局部变化	模式图		应用实例				
			沉积单元	不同时期沿层地震反演切片		原沉积相	修正后沉积相
河道侧积体			萨 III 32				
河道连续性变化			萨 II 4				
			萨 III 9				
河道规模变化			萨 III 6+7				
河道组合变化			萨 II 1+2				
河道期次			萨 II 15+16				

图 8 井-震联合沉积相修正模式总结与应用

Fig. 8 Summary and application of models of sedimentary facies correction through well-tied seismic inversion

井-震联合沉积微相研究重新落实了萨尔图油层河道砂体连通情况,这些新认识对剩余油研究有较大意义。对于河道连续性较差的萨一组,储层、含油性总体较差,由于局部含油性且河道横

向较窄,目前井网难以控制住,形成井网控制不住型剩余油;萨二组为主力厚油层,在长垣北部分流平原、三角洲前缘相带南移,相带及优质储层范围扩大,近岸区高弯度分流河道为重点油砂体,其砂

体规模较大,物性、含油性好,河道以切叠型复合砂体为主,层间非均质严重。如萨 III5 + 16 沉积单元层内非均质影响,形成注采不完善型剩余油。两期河道的划分能够优化封堵和压裂等方案的调整;萨三油层组总体上分流河道变窄,且比原认识更连续、更发育,向南延伸较远,且平面分布很密集,如萨 III32 沉积单元,区内识别出 8 支分流河道,分流河道平均分布密度约每支 0.25 km,主要为井网控制不住型剩余油。

5 结论

1) 提出一种曲线重构的方法,根据测井曲线不同频率尺度反映不同砂岩特征的特点,基于高频恢复、低频补偿思想,采用自然电位曲线的低频分量与电阻率曲线高频分量结合,重构出“拟波阻抗”曲线。重构曲线对砂岩和泥岩的区分较之前有很大改进,尤其对薄砂岩响应非常好,可提高储层横向预测精度。

2) 正演模拟和反演实践证明,在大套泥岩中含有薄砂岩的地质条件下,开发地震对刻画 2 m 薄层砂岩是可行的。对于大于 5 m 砂岩,通过井震精细标定,基本在地震剖面上能够得以识别;对于 2 ~ 5 m 间的薄层砂,井震联合反演能够分辨出;而对于小于 2 m 的泥包砂型薄砂层,仅当泥岩围岩在 2 m 以上时垂向能够分辨出。

3) 井-震联合沉积相研究主要在河道侧积体识别、河道连通关系(由连续变为间断、由间断变为连续)、河道规模变化(宽度、延伸长度、走向)、河道组合变化和河道期次划分 5 个方面完成微相的修正,总体上分流河道变窄且比原认识连续、更发育。规模较大分流河道含油性好,可形成较好的注采不完善型剩余油,小型分流河道局部含油性好但河道窄,以井网控制不住型剩余油为主。

参 考 文 献

- [1] 姚逢昌,甘利灯. 地震反演的应用与限制[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 53-58.
Yao Fengchang, Gan Lideng. Application and restriction of seismic inversion [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 53-58.
- [2] 李庆忠. 论地震约束反演的策略[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(4): 423-438.
Li Qingzhong. On strategy of seismic restricted in inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(4): 423-438.
- [3] 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 multi-wave 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.
- [4] 单敬福,王峰,孙海雷,等. 基于地震波阻抗反演的小层砂体预测技术——在大庆油田州 57 水平井区块的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 212-218.
Shan Jingfu, Wang Feng, Sun Hailei, et al. Prediction of sub-layer sandstones based on wave impedance inversion in the wellblock of the horizontal well Zhou 57 [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 212-218.
- [5] 吴媚,李维新,符力耘. 基于测井曲线频分析的地震反演[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(增刊): 65-71.
Wu Mei, Li Weixin, Fu Liyun. Seismic inversion based on logging trace frequency-shared analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(Supplement): 65-71.
- [6] 季玉新,刘春园,陈冬,等. 分频反演方法及其在塔河 A 区储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 38-42.
Ji Yuxin, Liu Chunyuan, Cheng Dong, et al. Frequency divided inversion and its application to reservoir prediction in Block A of Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 38-42.
- [7] 阎辉,李鲤鹏,张学工,等. 测井曲线的小波变换特性在自动分层中的应用[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 568-573.
Yan Hui, Li Lipeng, Zhang Xuegong, et al. Wavelet transform properties of well log and their application in automatic segmentation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(4): 568-573.
- [8] 凌云,惠晓宇,孙德胜,等. 储层叠后反演影响因素分析与地震属性解释研究[J]. 石油物探, 2008, 47(6): 531-558.
Ling Yun, Hui Xiaoyu, Sun Desheng, et al. Analysis on affecting factors of post-stack inversion and seismic attribute interpretation of thin reservoir [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(6): 531-558.
- [9] 许运新. 大庆长垣北部萨零组油气层浅层气分布特征与开发利用[J]. 石油勘探与开发, 1990, 4: 45-54.
Xu Yunxin. Distribution of the shallow gas reservoir in the Formation "S₀" and its development in the North of Daqing Placanticline [J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 4: 45-54.
- [10] 李庆忠. 岩性油气藏地震勘探若干问题的讨论(II)——关于垂向分辨率的认识[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3): 1-5.
Li Qingzhong. Discussion on seismic exploration of lithologic

- reservoirs (II)—Seismic vertical resolution [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(3): 1–5.
- [11] 邱睿, 李庆忠. 用砂泥岩互层模型检验垂向分辨率[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(4): 677–682.
- Qiu Rui, Li Qingzhong. Using a sand and mud interbed model to test the vertical resolution[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(4): 677–682.
- [12] 李庆忠. 岩性油气藏地震勘探若干问题的讨论(1) [J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(2): 1–15.
- Li Qingzhong. Discussion on seismic exploration of lithologic reservoirs (I) [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2): 1–15.
- [13] 李庆忠. 地震勘探分辨率与信噪比谱的关系——答云美厚“地震分辨率新认识”一文[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(2): 244–245.
- Li Qingzhong. Relationship between resolution of seismic exploration and spectrum of S/N ratio[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2008, 20(3): 1–5.
- [14] 黄军斌, 高利军, 高勇, 等. 辫状河流相薄砂体地震子波效应和识别方法[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(2): 225–231.
- Huang Junbin, Gao Lijun, Gao Yong, et al. Wavelet effect and recognition methods of thin sand bodies in braided river facies[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(2): 225–231.
- [15] 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.
- [16] Sams M S, Atkins D, Said N, et al. Stochastic inversion for high resolution reservoir characterisation in the Central Sumatra Basin[R]. SPE57260, 1999.
- [17] Shanor G, Rawanchaikul M, Sams M, et al. A geostatistical inversion to flow simulation workflow example [C] // Makarem Field, Oman: 63rd EAGE Conference and Technical Exhibition. Houston: EAGE, 2001.
- [18] 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*, 2007, 32(4): 554–558.
- Duan Yunqing, Wang Yanchun, Qin Tian, et al. Application of reservoir seismic inversion at Damintun Sag in Liaohe Oil-field[J]. *Earth Science*, 2007, 32(4): 554–558.
- [19] 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.
- [20] Sen M K, Stoffa P L. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing [J]. *Geophysics*, 1991, 56(10): 1624–1638.
- [21] 刘巧霞, 田仁飞, 钟宙灿. 模拟退火地震参数反演研究[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2009, 6(2): 186–188.
- Liu Qiaoxia, Tian Renfei, Zhong Zhoucan. Seismic parameters inversion using the simulated annealing method[J]. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit)*, 2009, 6(2): 186–188.
- [22] 黄捍东, 张如伟, 魏世平. 地震非线性随机反演方法在陆相薄砂岩储层预测中的应用[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 386–390.
- Huang Handong, Zhang Ruwei, Wei Shiping. Research on application of seismic nonlinear random inversion to reservoir prediction in the thin sandstone of continental deposits[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 386–390.
- [23] 崔凤林, 张向君, 王世清. 松辽盆地北部薄互层复杂构造的精细刻画方法与应用[J]. *地球科学*, 2005, 30(4): 503–508.
- Cui Fenglin, Zhang Xiangjun, Wang Shiqing. Meticulous depiction methodology and application of complicated structures of reciprocal thin layers in northern Songliao basin[J]. *Earth Science*, 2005, 30(4): 503–508.
- [24] 郑爱敏, 符志国, 廖娟. 地震反演储层预测技术在白马庙地区的应用[J]. *天然气工业*, 2009, 29(8): 47–49.
- Zheng Aimin, Fu Zhiguo, Liao Juan. The application of seismic inversion to reservoir prediction in Baimamiao Area, western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(8): 47–49.
- [25] 侯连华, 邹才能, 匡立春, 等. 老油气区精细勘探潜力与方法技术[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(1): 108–115.
- Hou Lianhua, Zou Caineng, Kuang Lichun, et al. Potential and technologies of refined exploration in mature oil and gas regions[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(1): 108–115.
- [26] 马世忠, 杨清彦. 曲流点坝沉积模式_三维构形及其非均质模型[J]. *沉积学报*, 2000, 18(6): 241–247.
- Ma Shizhong, Yang Qingyan. The depositional model, 3-D architecture and heterogeneous model of point bar in meandering channels[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(6): 241–247.

(编辑 董立)