

# 水驱油藏时移地震叠前匹配反演

## ——西非深水扇 A 油田时移地震研究实例

张会来\* 范廷恩 胡光义 张显文 樊鹏军 王宗俊

(中海油研究总院,北京 100027)

张会来,范廷恩,胡光义,张显文,樊鹏军,王宗俊. 水驱油藏时移地震叠前匹配反演——西非深水扇 A 油田时移地震研究实例. 石油地球物理勘探,2015,50(3):530-535,564.

**摘要** 水驱时移地震研究即是将基础数据与监测数据的地震响应差异翻译为油藏特征的变化。以深水扇油藏水驱开发时移地震研究为例,本文探讨了应用基于岩石物理研究的地震叠前匹配反演获得水驱开发敏感弹性属性体及其差异体的方法。通过流体替代开展岩石物理分析,对水驱过程中岩石物理参数的流体敏感性进行排序,确定匹配反演目标属性;深入讨论了影响匹配反演效果的子波、约束模型及关键参数等三个主要因素。匹配反演获得的多种水驱流体敏感属性体及其差异体为后续剩余油分布预测及油藏开采部署提供了可靠依据。

**关键词** 时移地震 叠前匹配反演 水驱敏感属性 弹性差异体 岩石物理参数 监测数据 基础数据

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.021

## 1 引言

时移地震是利用重复三维地震资料监测油藏变化,即油藏开发差异可由两次地震响应差异表征。研究过程中综合利用沉积储层信息、开发动态信息描述油气藏各种界面及其压力、温度、流体分布变化、波及面积等参数的变化<sup>[1,2]</sup>。现今国内时移地震研究以地震波形差异分析和振幅差异属性分析为主,针对弹性属性差异分析研究较少,未能对时移地震弹性差异做充分解读<sup>[3,4]</sup>。本文基于油田开发油藏变化参数时移地震岩石物理分析,提出针对油藏开发前后水驱敏感属性的时移地震叠前匹配反演方法,即以水驱开发敏感弹性属性为目标的反演方法和差异分析方法。

文中以西非深水扇 A 油田的时移地震数据为实例。该油藏属典型的深水海底扇储层类型,储层为水道多期砂岩复合体,油藏主要分布于背斜构造侧翼,受断层影响较小;储层为高孔、中—高渗砂岩,物性较好;属轻质挥发性原油,密度低。油藏采用边部注水、高部位采油生产方式,开采 32 个月,采出程

度超过 20%。为解决面临的采油井见水及随后的注采关系和井网调整等油藏开采问题,采集了第一次时移地震数据。下文将针对开发前采集的三维地震 5 个分角度叠加数据体(下称基础数据)和本次时移地震 5 个分角度叠加数据体(下称监测数据),开展时移地震综合研究。

## 2 水驱岩石物理参数敏感性分析

岩石物理分析是油藏水驱开采时移地震监测研究的基础,通过建立岩石物理模型,开展流体替代分析。基于 Gassmann 方程建立了岩石体积压缩模量、孔隙度、孔隙流体的体积压缩模量、岩石骨架的体积压缩模量和成岩矿物的体积压缩模量之间的关系<sup>[5]</sup>,替换 Gassmann 方程表示为

$$\frac{K_{sat1}}{K_0 - K_{sat1}} - \frac{K_{fl1}}{\phi(K_0 - K_{fl1})} = \frac{K_{sat2}}{K_0 - K_{sat2}} - \frac{K_{fl2}}{\phi(K_0 - K_{fl2})} \quad (1)$$

$$\mu_{sat1} = \mu_{sat2} \quad (2)$$

式中:  $K_{sat}$  为饱和岩石有效体积模量;  $K_0$  为成岩矿

\* 北京市朝阳区太阳宫南街 6 号海油大厦 B 座,100028. Email: zhanghl4@cnooc.com.cn

本文于 2013 年 12 月 31 日收到,最终修改稿于 2015 年 4 月 22 日收到。

物体积模量;  $K_{fl}$  为孔隙流体有效体积模量;  $\phi$  为孔隙度;  $\mu_{sat}$  为饱和岩石有效剪切模量; 下标 1 和 2 对应流体替换前、后状态。

基于 Gassmann 方程, 综合地质、油藏参数对 A 油田做水驱油流体替换分析。因该油藏为轻质原油(流体), 故水驱油引起的地层弹性参数变化较明显。流体替换前、后的流体敏感性参数定义为

$$F_p = \frac{F_w - F_o}{F_w} \quad (3)$$

式中:  $F$  为某种岩石物理参数, 如速度、密度等; 下标 w, o 分别表示水和油;  $F_p$  值越大表明参数  $F$  对流体越敏感。

对该油藏水驱油岩石物理分析表明: 水驱油引起的横波速度  $V_s$ 、密度  $\rho$ 、纵波速度  $V_p$  的平均流体敏感性分别为 1.9%, 4.5% 和 9.2% (图 1a); 进一步推导其他弹性参数的流体敏感性如图 1b 所示, 将其中 10 种流体敏感性岩石物理参数按从大到小排序为

$$I_p^2 - 2.15I_s^2, \lambda - 0.15\mu, \lambda, \lambda/\mu, \sigma, I_p, I_p/V_s, V_p, \rho, V_s \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  和  $\mu$  为拉梅常数;  $\sigma$  为泊松比;  $I_p$ 、 $I_s$  分别为纵、横波阻抗。显然, 参数  $I_p^2 - 2.15I_s^2$  对油藏开发过程中流体变化最为敏感, 因此本文将作为时移地震反演研究中两次反演目标弹性属性。

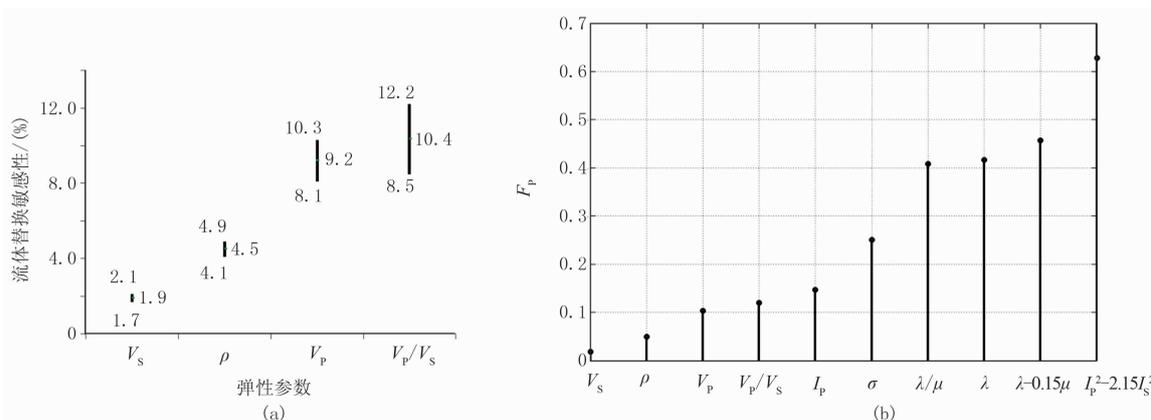


图 1 A 油田时移流体替换弹性参数分析

(a) 水驱油前、后速度、密度等的变化率; (b) 水驱油岩石物理参数敏感性排序

### 3 时移地震叠前匹配反演

#### 3.1 基本原理

叠前地震反演是利用地震反射振幅随炮检距或入射角变化的特征, 以测井资料为约束求取反映储层空间变化的多种弹性参数的储层预测技术<sup>[6]</sup>。时移地震叠前匹配反演基于常规叠前地震反演, 其基础数据反演与监测数据反演采用相同方法, 针对三参数同步反演关键环节进行分析、匹配, 消除两次反演实现过程中地震数据信息的非真实表达, 最终得到  $I_p^2 - 2.15I_s^2$  流体敏感属性体及其差异体。

反演算法定义最优化叠前反演弹性参数

$$F(V_p, V_s, \rho, x, y) = F_{contrast} + F_{seismic} + F_{trend} + F_{spatial} + F_{Gardner} + F_{Mudrock} + F_{SVD} \quad (5)$$

式中:  $F_{contrast}$  控制反演结果的稀疏性程度, 稀疏程度越高, 反演结果越优;  $F_{seismic}$  控制反演结果与输入数

据的相似程度;  $F_{trend}$ ,  $F_{spatial}$ ,  $F_{Gardner}$ ,  $F_{Mudrock}$  和  $F_{SVD}$  等参数依次控制反演目标参数的纵向变化趋势、空间变化、波阻抗与密度关系、岩石参数关系变化和反演计算。各函数  $F$  均遵从归一化  $L_p$  分布, 其中  $L_1$  分布为归一化平均值,  $L_2$  分布为归一化的均方根。定义稀疏性函数为

$$F_{contrast} = \left[ \frac{L_1}{\mu_{I_p}} \left( \frac{\Delta I_p}{I_{p-Tre}} \right) + \frac{L_1}{\mu_{I_s}} \left( \frac{\Delta I_s}{I_{s-Tre}} \right) + \frac{L_1}{\mu_\rho} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_{Tre}} \right) \right] \cdot M_{con} \quad (6)$$

表征稀疏不确定性参数。其中:  $\mu_{I_p}$  为纵波阻抗离散因子;  $\mu_{I_s}$  为横波阻抗离散因子;  $M_{con}$  为差异倍数因子。若  $\mu$  越大, 则反演结果越稀疏。再定义地震残差函数为

$$F_{seismic} = \left[ \sum_{Sub} \frac{L_2}{\mu_{Sub}} (S_{sei} - S_{syn}) \right] \cdot M_{sei} \quad (7)$$

式中:  $S_{sei}$  为地震数据道;  $S_{syn}$  为合成记录道;  $M_{sei}$

为地震残差倍数因子。残差越小,表征储层预测效果越佳。

### 3.2 三个关键环节

通过对反演目标函数及其求解过程的分析,明确叠前匹配反演实现过程中决定反演效果的好坏及两次反演匹配性的三个关键因素,即反射系数求解过程中参与子波的使用与匹配、反演属性体求解过程中约束模型的适用性与匹配、反演过程中关键参数的匹配等<sup>[7,8]</sup>。

#### 3.2.1 分角度叠加数据体组子波提取与匹配分析

该油藏匹配处理成果基础数据分角度叠加数据体组、监测数据分角度叠加数据体组均具有较好品质,表现为同组各数据体间及基础数据和监测数据对应数据体间具有较好的相位一致性、反射强度一致性(水驱范围外),地震振幅差异对水驱范围有较

好响应。如图2中基础数据 $21^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 叠加数据体(绿线)与监测数据 $21^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 叠加数据体(黑线)的波形叠合显示,反映非储层区两个数据的相位和反射强度均具有较好一致性;图3为5个对应角度叠加数据体差异振幅剖面,反映了水驱开发引起的振幅差异,其中两个近角度叠加数据体差异体信噪比相对较低。

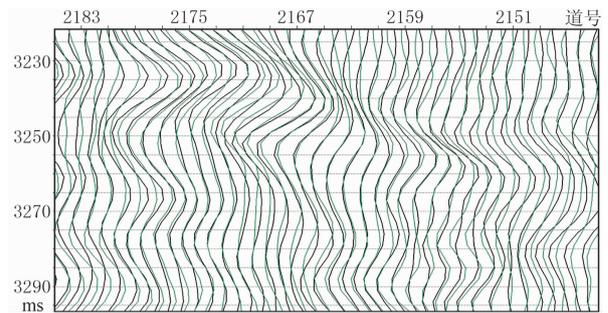


图2 用于时移地震 $21^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 叠加数据体波形叠合图

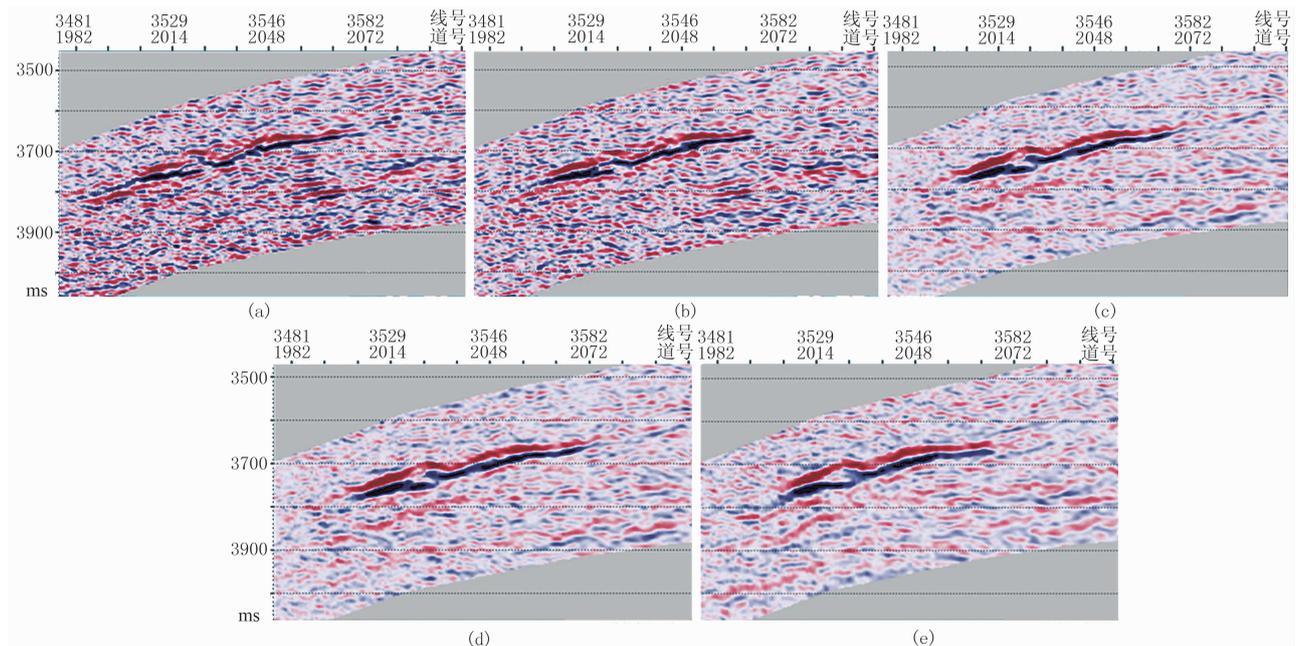


图3 时移地震5个分角度叠加差异数据体剖面

(a) $5^{\circ}\sim 13^{\circ}$ ; (b) $13^{\circ}\sim 21^{\circ}$ ; (c) $21^{\circ}\sim 29^{\circ}$ ; (d) $29^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ; (e) $38^{\circ}\sim 45^{\circ}$

两套数据体组井震标定与子波提取均遵循三条相同原则:①同一口井(针对不同数据体)的标定井段相同;②避开目的层段上、下大套泥岩弱反射干扰,仅标定目的层段地震数据;③标定过程中不对子波振幅相位做修饰性处理。通过以上子波提取三原则保证子波反映目的层真实地震特征,同时确保两套数据子波的可对比性。分析子波提取结果认为,各个子波具有较高的合成记录相关系数(图4),同组数据体子波相位一致性较好,两套数据体间子

波相位一致性、能量一致性均较好。

根据相同数据体子波具有很好一致性的特点,反演过程中相同数据体使用对应子波对的平均子波,即参加反演的各数据体子波为同一平均子波,实现子波一致性匹配。

#### 3.2.2 反演约束模型适用性分析与匹配应用

通常利用井插值模型作为叠前反演的先验输入,约束模型为反演求解过程提供值域约束,反演模型的约束增强了反演结果的稳定性,是对反演结果

有较大影响的关键环节<sup>[9]</sup>。

(1) A 油田反演约束模型存在的问题

反演约束模型一般基于井信息在地层框架内插实现。A 油田属典型的深水扇沉积,不同期次水道纵向叠置切割,沉积砂体横向变化快,井插值模型难

以精确反映储层砂体空间沉积特征,加大了井插值模型约束反演难度,影响对地震信息的真实表达,严重影响时移地震反演成果。如图 5 所示,依据井插值模型将两套水道复合体间的泥岩层错误地解释为连续的砂体分布。

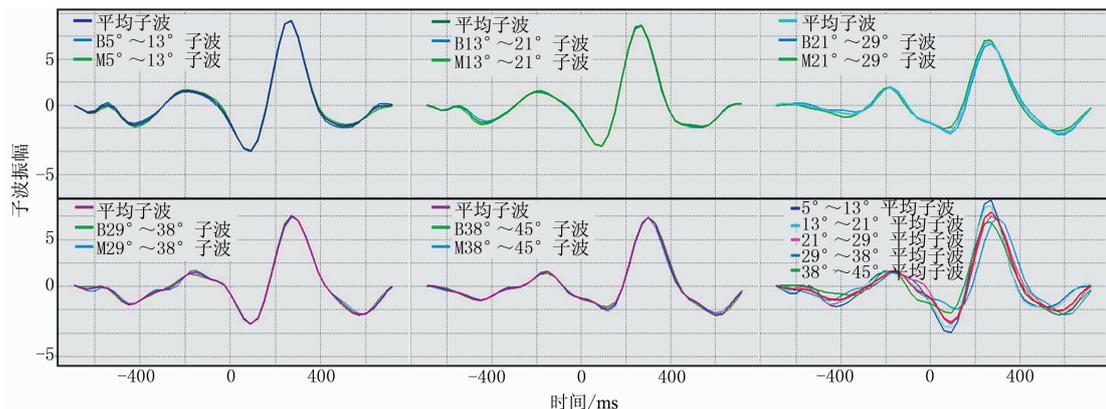


图 4 两套数据对应数据体子波叠合分析图

B:基础数据; M:监测数据

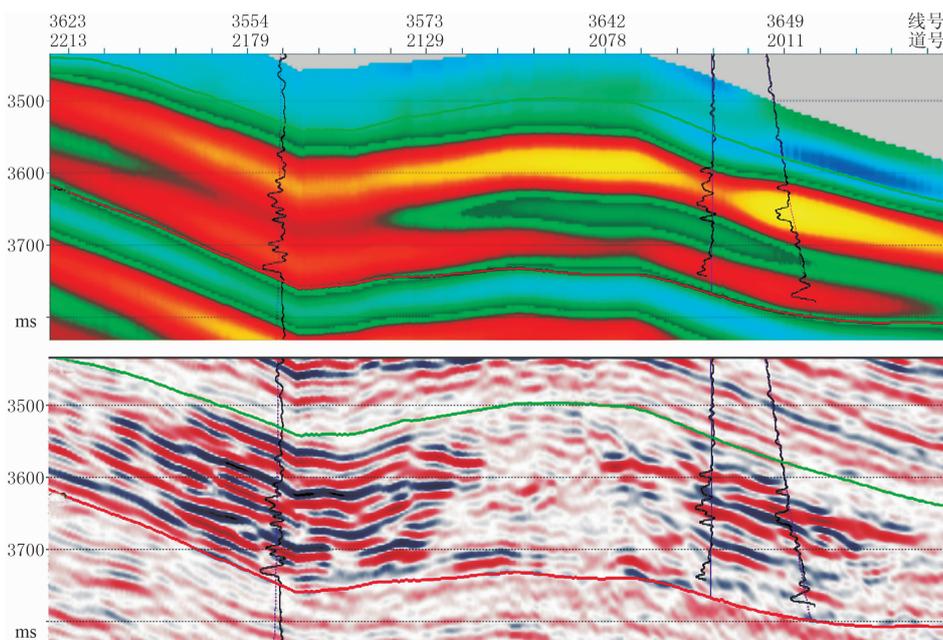


图 5 井插值模型(上)与原始地震数据(下)对比

(2) 约束模型改进

该油藏目的储层上下是岩性、物性相对稳定的深海泥岩沉积,即水道沉积具有稳定的泥岩背景。据相关数据推算:目的层段深海泥岩纵波阻抗约为  $6300 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,砂岩纵波阻抗变化范围是  $3000 \sim 9500 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;泥岩横波阻抗约为  $3200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,砂岩横波阻抗变化范围是

$1800 \sim 4600 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;泥岩密度约为  $2.3 \text{ g/cm}^3$ ,砂岩密度变化范围是  $1.6 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ 。基于该区储层沉积特点及目的层段深海泥岩具有稳定的岩性物性特征,提出泥岩背景模型约束叠前反演方法,即建立纵波阻抗、横波阻抗、密度泥岩常属性体约束反演,通过软趋势约束控制反演目标属性体值域范围,即储层信息由地震数据体真实表达,

由软趋势约束属性弹性百分比控制储层属性值域范围

$$\begin{aligned} I_P^{\text{shale}}(1-50\%) &< I_P^{\text{shale}} < I_P^{\text{shale}}(1+50\%) \\ I_S^{\text{shale}}(1-45\%) &< I_S^{\text{shale}} < I_S^{\text{shale}}(1+45\%) \\ \rho_P^{\text{shale}}(1-30\%) &< \rho_P^{\text{shale}} < I_P^{\text{shale}}(1+30\%) \end{aligned} \quad (8)$$

从图6可看出,基于改进模型约束的叠前反演结果能更准确地表征地震数据中蕴含的沉积信息,如图6a、图6b中黄白色区域即反映砂岩沉积。

### (3) 匹配反演模型应用匹配分析

基于开发前后基础数据反演与监测数据反演的

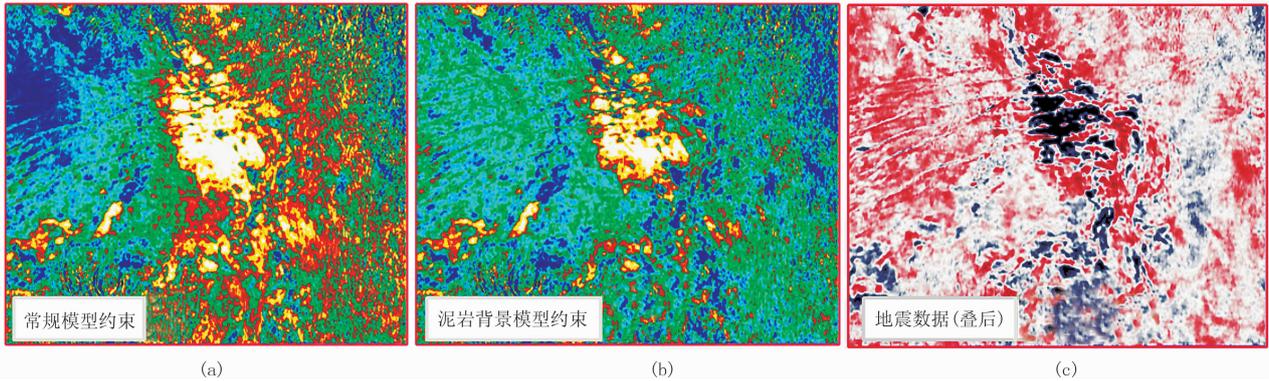


图6 两种模型约束反演(a、b)与初叠地震数据(c)横向储层展布对比

地质目标一致,岩性背景均为深海泥岩沉积,应用上述深海泥岩背景属性模型约束两次反演。泥岩背景模型与反演参数控制相结合,可规避模型对地震差异部分的影响,该部分属性均由几个角道集叠加数据体控制,泥岩背景模型约束的反演结果能更准确地表达地震数据中蕴含的沉积信息。

### 3.2.3 叠前反演关键参数分析与匹配

叠前三参数同步反演中,反射系数序列控制参数、奇异值分解控制参数、模型合并低频控制参数均对反演结果有较大影响。反射系数序列控制参数是控制地震数据体获得反射系数序列稀疏性的参数,准确选取该参数可使反射系数能真实反映地震数据反射特征。该参数过大则使分辨率高于地震,但噪声大;该参数过小则分辨率低于地震,噪声小。奇异

值分解控制参数可控制反演运算复杂矩阵的简化程度。若矩阵简化,则反演速度快,会出现结果不能准确反映地震真实特征的现象;若矩阵相对复杂,则将减慢反演速度。模型合并低频控制参数,能控制约束模型合并到反演中的频率范围,合理选取该参数可使反演结果更真实地反映地震数据所蕴含的信息。该参数过大则会影响不合理频段地震信息的表达,对反演结果影响大;该参数过小,则反演结果横向、反演属性体空间特征连续性变差,不符合地质规律。

匹配反演实施过程中两套反演应用的地震数据具有很好的一致性,反演过程中关键参数基本一致,且统一应用相同的反演过程控制参数,规避因反演参数可能带来的反演结果异常差异。

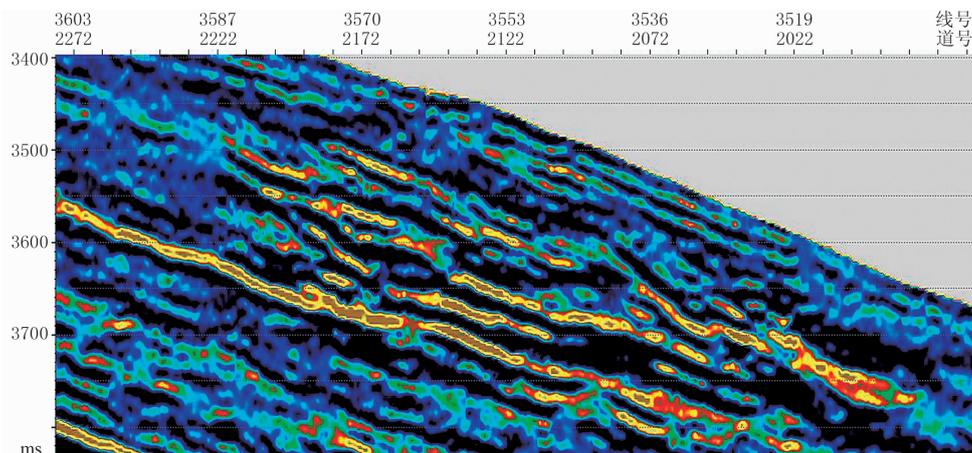


图7 时移地震匹配反演剖面展示的水道砂体特征

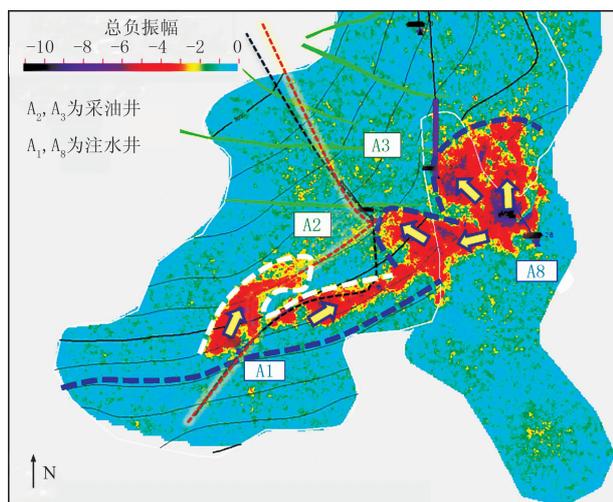


图 8 时移地震监测水驱的综合效果图  
红黄区域为水驱范围

### 3.3 匹配反演效果分析

A 油田的匹配反演以叠前地震反演为基础,通过反演关键环节及关键参数的控制,有效地解决了子波匹配、模型不适用及反演控制参数可能带来的异常差异等问题。图 7 所示的基础数据反演和监测数据反演成果剖面清晰地展示了储层水道纵向叠置关系、横向岩性边界。

图 8 中 A8 和 A1 两井为注水井, A2 和 A3 两井为采油井, 蓝虚线为 A8 井水驱前缘, 白虚线为 A1 井水驱前缘, 黄色箭头为结合储层平面特征分析的水驱优势通道方向。时移地震监测数据采集时间点, A3 井已含水 30%, 反演差异数据平面特征和剖面特征(图 9)均反映该井已部分水淹, 证实反演差异特征与实际开采油藏特征较吻合。

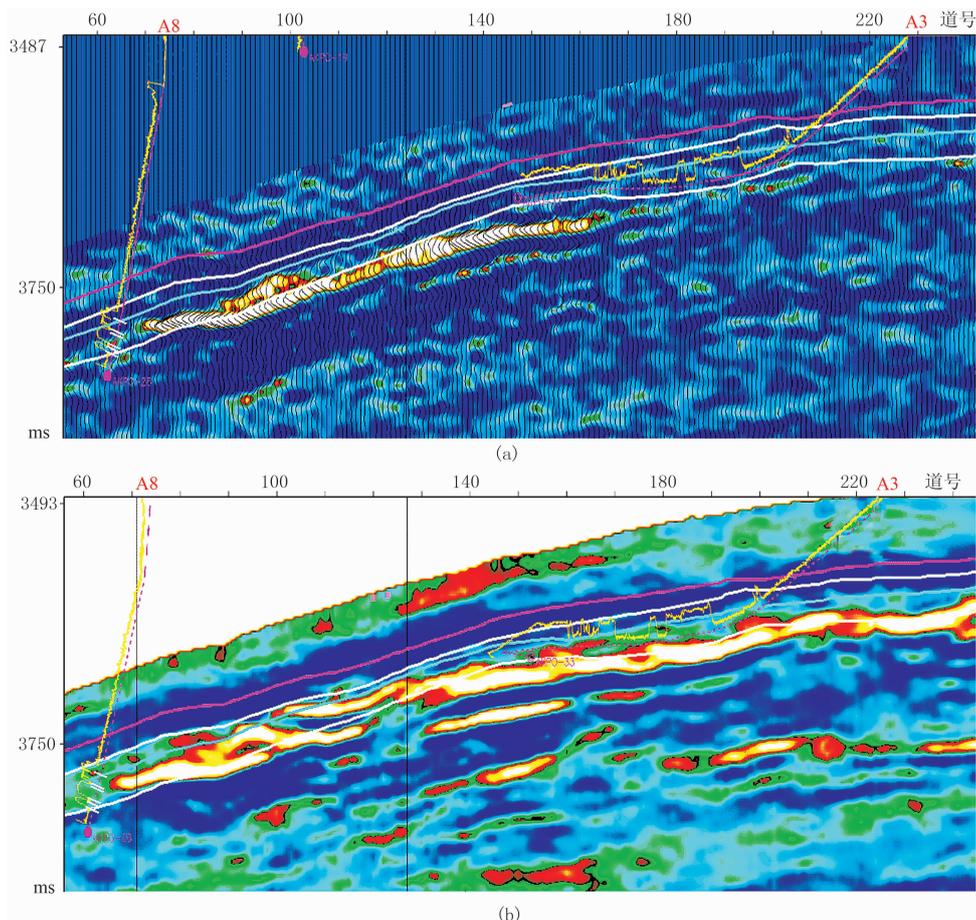


图 9 过 A8-A3 井时移地震水驱差异属性(a)和储层特征(b)剖面图

## 4 结束语

岩石物理分析是时移地震研究的基础, 针对流

体、压力、温度等油藏关键参数的地震响应分析为后续时移地震反演与解释提供了重要依据。

本文的时移地震匹配反演研究以叠前地震三参  
(下转第 564 页)

ic method excited by loop source. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 754-765.

- [21] 李建慧, 胡祥云, 曾思红等. 基于电场 Helmholtz 方程的回线源瞬变电磁法三维正演. *地球物理学报*, 2013, 56(12): 4256-4267.  
Li Jianhui, Hu Xiangyun, Zeng Sihong et al. Three-dimensional forward calculation for loop source transient electromagnetic method based on electric field Helmholtz equation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4256-4267.
- [22] 朴化荣. 电磁测深法原理. 北京:地质出版社, 1990.  
Piao Huarong. *Theory of Electromagnetic Sounding*. Beijing: Geological Publishing House, 1990.

(本文编辑:冯杏芝)

## 作者简介



李建慧 讲师, 博士, 1982年生; 2005年本科毕业于昆明理工大学资源环境与城乡规划管理专业; 2008年毕业于中国矿业大学, 获地球探测与信息技术专业硕士学位; 2011年毕业于中南大学, 获地球探测与信息技术专业博士学位; 现在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院从事电法勘探教学与科研工作。

(上接第 535 页)

数反演为基础,重点讨论了影响反演结果的关键因素,即子波、约束模型、反演参数的分析、匹配与应用,实现了基础数据反演与监测数据反演互动匹配的综合反演研究思路。时移地震匹配反演研究将时移地震振幅差异信息演绎为流体变化信息,将振幅差异转换为水驱特征信息。应用该项技术,为 A 油田后续剩余油藏监测提供了可靠依据。

## 参考文献

- [1] Blanchard T D. Introducing prior information to pressure and saturation inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2013, TL3. 3.
- [2] Kondal Reddy, Menal Gupta, Ray McClenaghan. Estimation of pore pressure and oil saturation changes in the reservoir using petro-elastic modeling and 4D AVO inversion attributes in the Ravva field. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2013, TL3. 5.
- [3] 甘利灯, 姚逢昌, 杜文辉等. 水驱油藏四维地震技术. *石油勘探与开发*, 2007, 42(4): 437-443.  
Gan Lideng, Yao Fengchang, Du Wenhui et al. 4D seismic technology for water flooding reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 42(4): 437-443.
- [4] 凌云. 薄储层叠后反演影响因素分析与地震属性解释研究. *石油物探*, 2008, 47(6): 531-558.  
Ling Yun. Influential factors analysis of post-stack inversion for thin-bed reservoir and research for seismic attribute interpretation. *GPP*, 2008, 47(6): 531-558.
- [5] 王玉梅. 岩石物理横波速度曲线计算技术. *油气地质与采收率*, 2006, 13(4): 58-61.  
Wang Yumei. Rock physical shear wave velocity computational technology. *Petroleum Geology and*

*Recovery Efficiency*, 2006, 13(4): 58-61.

- [6] 孙德胜, 凌云, 夏竹等. 3.5维地震勘探方法及其应用. *石油物探*, 2010, 49(5): 460-472.  
Sun Desheng, Ling Yun, Xia Zhu et al. 3.5D seismic prospecting technology and application. *GPP*, 2010, 49(5): 460-472.
- [7] 黄石岩. 王 91 块四维地震资料处理解释及应用研究. *石油天然气学报*, 2008, 30(4): 96-99.  
Huang Shiyan. 4D seismic processing and interpretation in Wang 91 block. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(4): 96-99.
- [8] 易为启, 王家林. 油气藏地球物理监测的基础及其方法探讨. *同济大学学报*, 2000, 28(6): 711-715.  
Yi Weiqi, Wang Jialin. The base and method of reservoir geophysical monitoring discussion. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(6): 711-715.
- [9] 田春志, 陈小宏, 张国才等. 时间推移地震数据匹配研究及分析. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(6): 635-639.  
Tian Chunzhi, Chen Xiaohong, Zhang Guocai et al. Matching study on time-lapse seismic data volume and its analyses. *OGP*, 2002, 37(6): 635-639.

(本文编辑:朱汉东)

## 作者简介



张会来 硕士, 1979年生; 2005年本科毕业于中国石油大学(北京)信息工程专业, 2008年获该校地球探测与信息技术专业硕士学位; 现在中海油研究总院从事油田开发地震综合研究, 兴趣领域包括地震构造研究、地震反演、时移地震应用研究等。