

模拟退火波阻抗反演技术在苏北盆地 高邮凹陷曹庄地区的应用

季红军^{1,2} 李中元² 夏连军² 沈 荣²

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

2. 江苏油田物探技术研究院, 江苏 南京 210046)

摘要:地震反演技术能够大幅度提高地震资料分辨率,最大限度地挖掘地震资料所蕴涵的极其丰富的岩性、物性信息,是目前寻找隐蔽油气藏的有效手段之一。模拟退火波阻抗反演通过模型空间范围内广泛搜索寻求全局最优解,可以明显提高反演剖面的分辨率。利用 ISIS 模拟退火波阻抗反演技术,对苏北盆地高邮凹陷曹庄地区戴南组岩性储层进行精细预测,较好的描述了戴南组 3 个主要岩性储层发育段砂体平面展布规律。

关键词:地震反演;模拟退火波阻抗反演技术;ISIS;高邮凹陷;戴南组;砂体预测

中图分类号:P622⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)06-1431-06

地震反演技术综合地震、钻井、测井资料,将界面型的地震资料转换成岩层型的测井资料,使其能与钻井、测井直接对比,以岩层为单元进行地质解释,研究储层特征的空间变化。目前运用较多的反演方法有约束稀疏脉冲波阻抗反演技术等,这类反演方法都是利用迭代计算使目标函数极小而获得反演结果,其解的分辨率往往受地震资料的频带限制,反演能力相对有限。模拟退火波阻抗反演采用全局最优化波阻抗反演,通过变差函数作为模型驱动,大大提高储层的垂向分辨率,消除了局部最优方法的限制。ISIS 三维地震反演(ISIS3D Seismic Inversion)是一种利用快速模拟退火算法进行全局优化的多道反演系统,其抗噪能力强,分辨率高,忠实于地震资料,特别适合于复杂断块岩性及复合油(气)藏砂体预测。苏北盆地高邮凹陷曹庄地区戴南组(E₂d)主要发育近岸水下扇和冲积扇砂体,砂体上倾方向往往被断层所切割,砂体扇端部位与半深湖-深湖泥岩组合,分布范围小,横向减薄迅速,是典型的断块岩性和复合油藏发育区。

1 算法原理及特点

“退火”在物理学中用来描述晶体物质的生成过程:当温度升高,固态物质发生熔化,此时其中的粒子可以自由运动。然后降温使其冷却凝固,若在凝固点附近温度下降速度足够

慢,其中粒子可自动有序排列,此时晶体物质可形成最低能量的基态。受此过程启发,Rothman 将“退火原理”引入地球物理资料的反演,称其为模拟退火反演算法。

模拟退火反演算法是一种全局最优算法,该计算可简化描述为以下过程:随机选取模型空间任意一点并计算其能量 f_0 ,若新点能量 f 低于 f_0 ,即 $f-f_0=\Delta f<0$,此时原模型被无条件替代;若新点能量 f 高于 f_0 ,即 $f-f_0=\Delta f>0$,此时原模型被替代的概率为 $p=e^{-\Delta f/T}$,其中 T 为某一控制参数的“伪温度”。让 T 从一足够高的值慢慢降低,对每一个 T 在模型空间做随机扰动计算 Δf ,当随机扰动重复次数足够后,目标函数保持不变,系统达到热平衡状态,此时能量最低,此模型即为使目标函数全局最小的模型。

传统模拟退火算法速度很慢,ISIS 地震反演技术对模拟退火算法进行了改进,是一种用快速模拟退火算法进行的全局优化的多道反演系统,也是一种非线性随机反演方法,采用定向蒙特卡罗随机搜索过程。该过程模拟金属冷凝过程中晶体自动有序排列的理论,对准备反演的模型在一规定的搜索区内做大量随机的参数修改(扰动),并计算反演结果与实际地震资料的误差,选择误差最小的一些参数指导后来的修改(扰动量),并逐步“降温”,使扰动量逐步缩小范围,最终得到最佳解,即反演结果。

收稿日期:2006-03-15;改回日期:2006-08-06

基金项目:SINOPEC 科研项目(P03012)资助。

作者简介:季红军,男,1977 年生,工程师,主要从事石油地质综合评价工作;E-mail:jihj@joeco.com.cn。

2 关键技术

2.1 层位标定与子波估算

子波是基于褶积模型的反演方法中的关键因素,子波选取的好坏直接影响井震标定的成败,进而影响地震反演的结果。在 ISIS 反演时,层位标定和子波估算迭代进行,直至合成记录与地震记录的相关性最大,能量谱最接近为止,此时合成记录与实际地震资料的误差最小。主要通过测井曲线层位标定和子波估算的迭代来实现反演。

众所周知,在地震波传播过程中,子波随深度增加而衰减,衰减量与深度呈指数关系。曹庄地区戴南组地层早期充填、中后期超覆的特殊沉积形式,造成地层纵向上深度变化较大,反映在地震资料上从 1 800 ms 到 2 500 ms 均有戴南

组地层分布。因此对此类大时窗数据体进行反演,用一固定的子波与反射系数褶积,必然会影响深层资料的分辨率。针对曹庄地区地震资料的实际情况,采用时变子波参与最终反演,子波的主频、振幅和相位根据井旁地震道的主频,增益变化而变化,大大提高了深层资料的分辨率。模拟退火反演算法采用频率衰减因子和增益因子来约束时变子波。频率因子用来控制子波纵向频率的变化,通过计算地震资料频率随深度变化得到,在相位不变的前提下,频率因子与品质因子 Q (代表岩石的一种固有属性)呈倒数关系;增益因子 G 用来控制子波纵向振幅的变化,通过计算井点处反射系数的能量 E_s 对数与井旁地震道能量 E_r 对数差得到,即 $G = \log(E_s/E_r)$ 。浅层频率高,增益小;深层频率低,增益大,大大提高了深层地震资料分辨率。经过反复试验,选取步长 21 的子波作为最终反演子波。

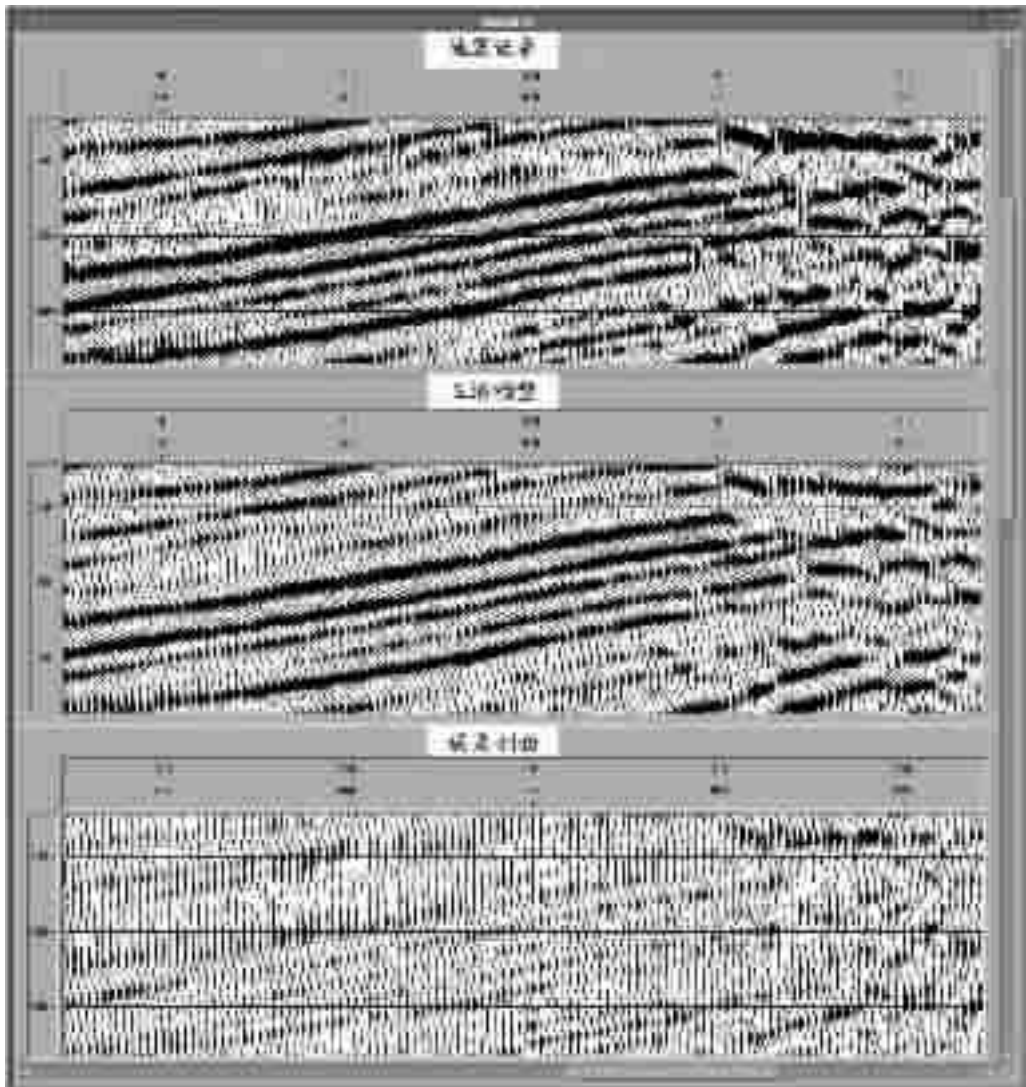


图 1 曹庄地区 inline 310 测线反演误差分析剖面

Fig.1 Seismic inversion error analysis section of inline 310 in the Caozhuang area

2.2 初始模型

地下地层接触关系异常复杂,常规反演一般通过精细层位解释或自下而上逐层定义各层空间接触关系来建立沉积模型。为解决低频模型井间内插时产状控制问题,模拟退火算法除了用沉积信息,还用地震剖面上估算的倾角信息,经特殊滤波之后形成“无数”个沉积层序来引导内插、外推时的产状控制。这样大大降低了反演对解释层位的依赖和误差,丰富了层序内部信息,保证了反演工作横向分辨率的可信性。

Inline 方向地层倾角计算公式:

$$S_x = -\frac{\frac{\partial d}{\partial t} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{\partial d_H}{\partial t} \frac{\partial d_H}{\partial x}}{\left(\frac{\partial d}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_H}{\partial t}\right)^2} \quad (1)$$

Crossline 方向地层倾角计算公式:

$$S_y = -\frac{\frac{\partial d}{\partial t} \frac{\partial d}{\partial y} + \frac{\partial d_H}{\partial t} \frac{\partial d_H}{\partial y}}{\left(\frac{\partial d}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_H}{\partial t}\right)^2} \quad (2)$$

式中 S_x 和 S_y 分别为 Inline 和 Crossline 方向倾角, $d(t, x, y)$ 为地震信号, $d_H(t, x, y)$ 为地震信号的 Hilbert 变换, t 为双程旅行时, x 为 Inline 方向水平距离, y 为 Crossline 方向水平距离, x, y 单位均为 m。为了使估算更接近实际情况,公式中分子和分母在相除前都要进行低通滤波。

这样计算出来的倾角体并不能直接用于低频模型井间内插,必须将其转换为标量 $h(t, x, y)$,称之为层序场。在层序场中,每一个沉积层序都赋予一个确定的值,在没有断层的情况下,该值随深度的增加而增大。层序场与倾角体的关系用下式表示:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -S_x \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = -S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

通过层序场结合精细解释层位来引导内插、外推时的产状控制,可最大限度地利用地震资料中包含的地层信息,大大提高了反演的纵向分辨率和横向可靠性。

2.3 三维地震数据体波阻抗反演

ISIS 反演技术从随机模型开始反演,采用稀疏脉冲方法区别信号和噪声,用两套反演参数,一套为稀疏参数,专门用于确定反射界面的准确位置,一套为稠密参数,专门用于确定反射界面的反射强度,大大提高资料分辨率。

同时,ISIS 反演采用多道反演系统,在其优化函数中,采用信噪比、相干性、低频模型偏差、反射系数门槛值为约束条件,联合选取一个平滑的最优模型,以误差的形式剔除噪声,有效地摆脱高频随机噪声干扰。经过反复试验,最终选取曹庄地区戴南组地震反演模型参数:信噪比为 18,水平连续性参数为 0.04,低频模型偏差为 0.05,反射系数门槛值为 0.01。从曹庄地区 Inline 310 测线反演误差分析剖面(图 1)可以看出,误差剖面中信息杂乱无章,高频随机噪声以误差的形式

得到有效剔除,较好地提高了反演资料的信噪比。

3 应用波阻抗数据体进行储层预测

联合测井资料和地震资料求取的三维波阻抗数据体与原始地震资料相比具更高的分辨率。在常规地震记录上无法分辨的复波在反演得到的绝对波阻抗剖面上已能清晰分开。在曹庄地区利用反演得到的波阻抗数据体追踪了 $E_2d_2^5$ 下砂组、 $E_2d_1^1$ 三高导下砂组和 $E_2d_1^1$ 砂组底界面,明显反映了该区戴南组砂体发育特征;C27 井高部位靠近断层的区域砂岩比较发育,砂体被断层切割,与断层上升盘泥岩接触;往凹陷中心,砂岩逐渐减薄,尖灭形成岩性圈闭(图 2)。

由于反演得到的波阻抗体只能定性地反映沉积物源方向及砂岩发育趋势。要想定量描述储层砂岩发育情况,首先利用经验公式将波阻抗转换为速度:

$$V = (I/0.15)^{0.75} \quad (5)$$

式中 V 为速度, m/s; I 为阻抗值, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在此基础上制作工区 $E_2d_2^5$ 下砂组、 $E_2d_1^1$ 三高导下砂组和 $E_2d_1^1$ 砂组速度—深度岩性量板,拟合出各砂组砂、泥岩压实曲线,根据下式计算砂岩百分含量。

$$\text{Per} = \frac{V - V_{\text{泥}}}{V_{\text{砂}} - V_{\text{泥}}} \quad (6)$$

式中: Per —砂岩百分比; V —储层组的绝对速度; $V_{\text{砂}}$ —纯砂岩速度; $V_{\text{泥}}$ —纯泥岩速度。

在实际预测过程中,将区内所有钻井所揭示的砂岩百分含量作为约束条件,用来校正预测结果,有效地降低了预测误差,最终准确地预测出 3 个砂组的砂岩百分含量(图 3~5)。该预测结果与地质统计得到的砂岩分布规律基本一致,曹庄地区戴南组储层物源主要为南部江都隆起,表现为明显的冲积扇和近岸水下扇沉积体系;越靠近物源方向,砂岩越发育,向凹陷中心,泥质含量明显增多,渐过渡为深湖—半深湖相沉积。

4 应用效果

曹庄地区戴南组 3 个主要目的层砂岩百分含量预测结果显示,该区砂岩百分含量在 10%~30%,是寻找隐蔽油藏砂岩配置较为有利的地区。依据此预测结果,在 C27 块构造高部位、砂岩百分含量 25%左右处部署 C61 井。该井实钻在戴南组电测解释油层 11.7 m/4 层,油水同层 21.2 m/5 层,取得较好勘探效果;其中戴南组实钻砂岩百分含量为 27%,与预测结果相差仅 2%,预测精度较高。

5 结语

ISIS 地震反演技术采用全局优化模拟退火波阻抗反演方法,在解决油田开发和勘探阶段寻找构造油藏、岩性油藏、识别断层方面有着较为理想的应用效果。子波的选取对于最终反演结果十分关键,须经过反复试验,根据子波的相位、波

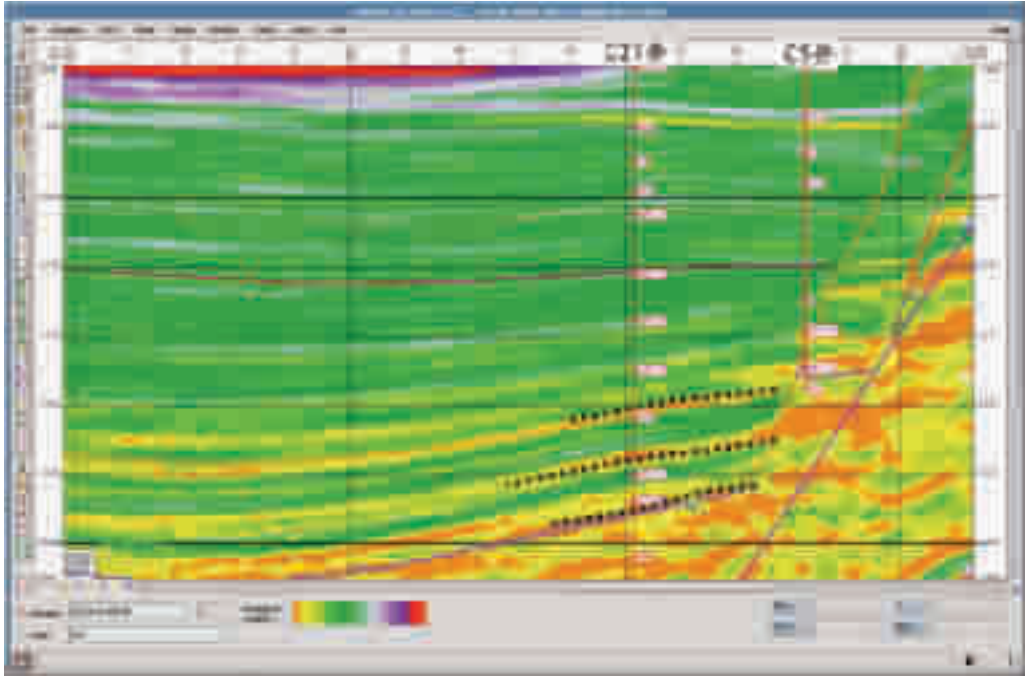


图 2 曹庄地区 Inline223 测线反演波阻抗剖面

Fig.2 Seismic inversion wave impedance section of inline 223 in the Caozhuang area

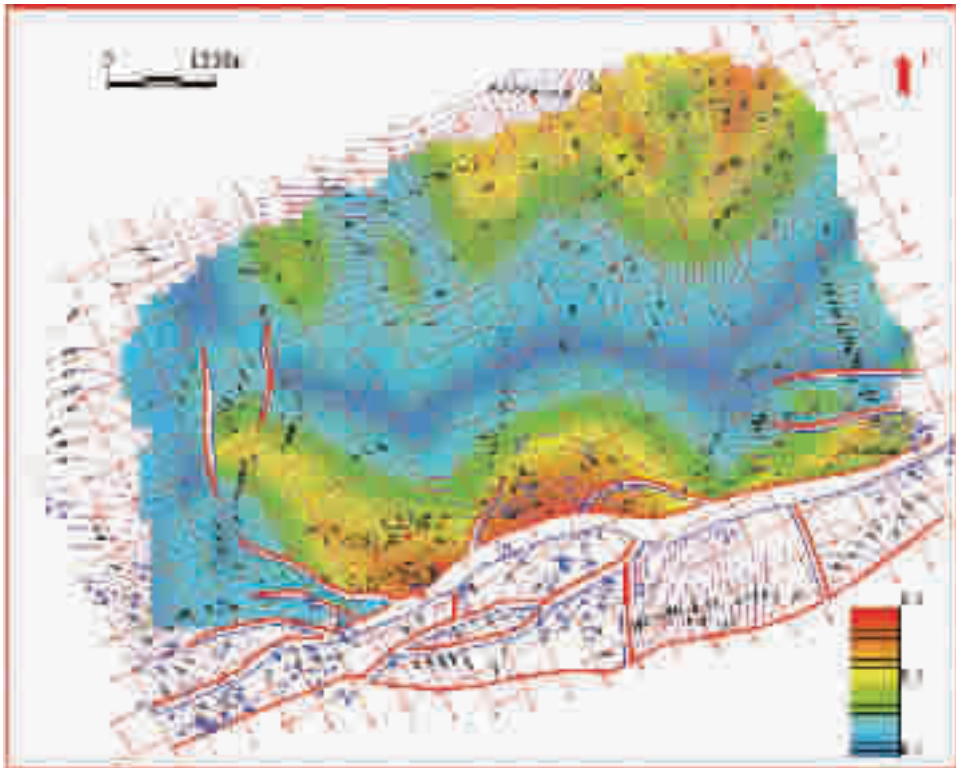


图 3 曹庄地区E₂d₂砂岩百分含量预测图

Fig.3 Sandstone percentage map of E₂d₂ in the Caozhuang area

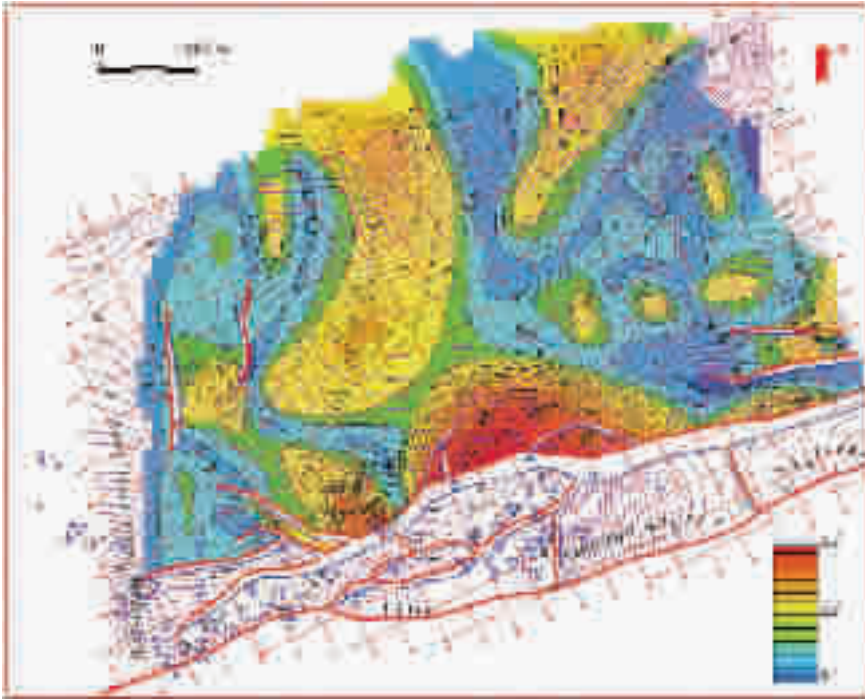


图 4 曹庄地区 E_2d_1 砂岩百分含量预测图

Fig.4 Sandstone percentage map of E_2d_1 in the Caozhuang area

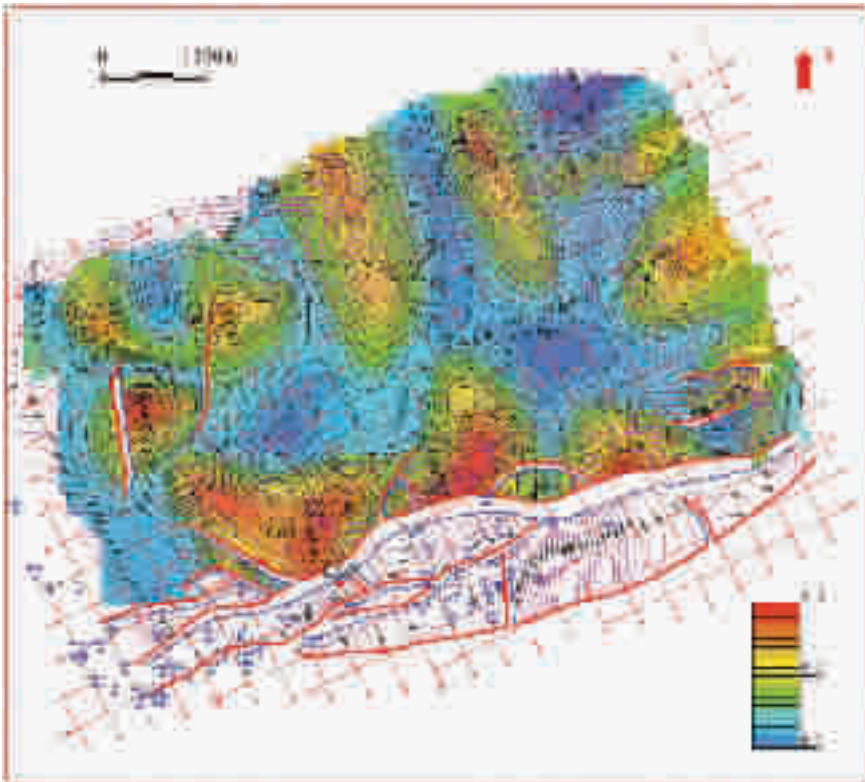


图 5 曹庄地区 E_2d_1 砂岩百分含量预测图

Fig.5 Sandstone percentage map of E_2d_1 in the Caozhuang area

形、振幅谱以及合成记录地震道与井旁地震道的匹配情况综合评价。由于其忠实于地震资料的特点,因此对地震资料进行高分辨率、保幅处理对于提高反演预测精度有着极为重要的作用。在曹庄地区运用 ISIS 模拟退火波阻抗反演得到了高分辨率波阻抗体,对于在常规地震剖面上无法识别的砂层(组)可以全区对比追踪,大大提高了资料解释的精度。

参考文献 (References):

- [1] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:石油大学出版社,1993.254~261.
Lu Jimeng. Seismic Prospecting Principles [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1993.254~261(in Chinese).
- [2] 孙家振, 李兰斌. 地震地质综合解释教程[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2002.141~145.
Sun Jiazhen, Li Lanbin. Seismic-geologic Integrated Interpretation Tutorial [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 2002.141~145(in Chinese).
- [3] 马力, 葛泰生, 赵学平, 等. 中国东部的含油盆地和隐蔽圈闭[A]. 见 Michel T.Halbouty 主编. 寻找隐蔽油藏[C]. 北京:石油工业出版社, 1988.248~265.
Ma Li, Ge Taisheng, Zhao Xueping, et al. The oil basin and subtle trap of the east in China [A]. In:Michel T.Halbouty (ed.). The Deliberate Search for the Subtle Trap [C]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1988.248~265(in Chinese).
- [4] 薄永德, 贺向阳. 苏北盆地高邮凹陷邵伯西地区戴南组隐蔽油藏研究[J]. 石油物探, 2004,43(2):159~162.
Bo Yongde, He Xiangyang. Study of subtle reservoirs of Dainan Formation in western Shaobo in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43 (2):159~162 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘振宽, 金成志, 吴世旗, 等. 模拟退火波阻抗反演及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2003,22(6):67~68.
Liu Zhenkuan, Jin Chengzhi, Wu Shiqi, et al. Simulated annealing wave impedance inversion and its application[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003,22 (6):67~68 (in Chinese with English abstract).
- [6] 祁德清, 丁正青, 杨军, 等. 地震技术在下第三系戴南组薄层岩性油藏开发中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2004,27(3):195~199.
Qi Deqing, Ding Zhengqing, Yang Jun, et al. Application of seismic technologies in the development of the Lower Tertiary D2N thin sand lithologic reservoir [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004,27(3):195~199(in Chinese with English abstract).
- [7] Haldorsen H H, Damsleth E. Stochastic modeling [J]. JPT. 1990,42 (4):404~412.

Application of the simulated annealing wave impedance inversion technique in the Caozhuang area, Gaoyou subbasin, Subei basin

JI Hong-jun^{1,2}, LI Zhong-yuan², XIA Lian-jun², SHEN Rong²

(1.School of Earth Resources and Information, University of Petroleum (East China), Dongying 257061, Shandong, China

2.Geophysics Research Institute, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: The seismic inversion, which is one of the effective techniques for searching for subtle oil/gas traps, can enhance the resolution of seismic data greatly and extract abundant lithological and physical information involved in seismic data to the maximum. Simulated annealing wave impedance inversion pursues the comprehensive optimal solution widely in the space scope of the model, which can enhance the resolution of the inversion section markedly. The lithological reservoirs in the Dainan Formation in the Caozhuang area, Gaoyou subbasin, Subei basin, were predicted in detail by the ISIS3D simulated annealing wave impedance inversion technique. The results better describe the plan distribution characteristics of sands of three main lithological reservoirs in the Dainan Formation.

Key words: seismic inversion; simulated annealing wave impedance inversion technique; ISIS; Gaoyou subbasin; Dainan Formation; sand prediction

About the first author: JI Hong-jun, male, born in 1977, bachelor and engineer, specializes in petroleum geology; E-mail: jihj@joeco.com.cn.