

基于地震波形指示的碳酸盐岩储集体反演方法

——以塔河油田中-下奥陶统为例

韩长城¹, 林承焰^{1,2,3}, 任丽华^{1,2,3}, 董春梅^{1,2,3}, 魏婷⁴

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东省油藏地质重点实验室, 山东 青岛 266580;

3. 中国石油 油气储层重点实验室 中国石油大学(华东) 研究室, 山东 青岛 266580; 4. 中国石油 新疆油田分公司
石西采油厂, 新疆 克拉玛依 834000]

摘要:塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶储集体埋深大,分布不均,类型复杂,具有较强的非均质性,储集体类型识别一直是该区油气勘探和开发的难题。为此,基于贝叶斯判别理论和马尔科夫链蒙特卡罗抽样算法,实现了一种新型波阻抗反演方法。在储集体类型识别、地震反射特征和岩石物理分析基础上,利用地震波形相似性优选样本井,参照样本空间分布距离和曲线分布特征建立初始阻抗模型。通过建立建议分布与先验信息之间的关系,实现先验解空间的有效采样,同时采用 Metropolis-Hastings 抽样算法对贝叶斯后验概率分布抽样,从而获得最大后验概率解。将该反演方法应用到塔河油田奥陶系岩溶储集体类型识别中,在反演精度得到明显提高的同时,充分利用了地震波形横向变化特征反映岩溶储集体空间分布位置和横向展布规律,有效识别了岩溶储集体类型,为非均质极强的岩溶缝洞储集体的精细表征提供有力支撑。

关键词:波形指示反演;贝叶斯理论;岩溶储集体;奥陶系;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Waveform-indication-based seismic inversion of carbonate reservoirs: A case study of the Lower-Middle Ordovician in Tahe oilfield, Tarim Basin

Han Changcheng¹, Lin Chengyan^{1,2,3}, Ren Lihua^{1,2,3}, Dong Chunmei^{1,2,3}, Wei Ting⁴

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Reservoir Geology Key Laboratory of Shandong Province, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. PetroChina Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 4. Shixi Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: Carbonate karst reservoirs of the Lower-Middle Ordovician in Tahe oilfield feature in large burial depth, irregular distribution, complex reservoir types and strong heterogeneity, thus reservoir type identification is always a challenging during oil and gas exploration and development in the area. This paper documented a new impedance inversion method, i. e. waveform-indication-based inversion, based on Bayesian discriminant theory and Markov Chain Monte Carlo sampling algorithm. The method, based on reservoir type identification, seismic reflection characteristics and petrophysical analyses, can be used to optimize sample wells by observing seismic waveform similarities, and establish an initial impedance model by referring to sampling spacing and curve characteristics. The relationship between proposed distribution and prior information is firstly established to achieve efficient sampling of a priori solution space. A Metropolis-Hastings sampling algorithm is then used to sample the posterior probability distribution, so as to obtain the maximum posterior probability solution. The application of the method in identifying the types of the Ordovician karst reservoirs in Tahe Oilfield shows significant improvement of inversion accuracy and a better utilization of horizontal variation of seismic waveforms to reveal effectively the types and spatial and lateral distribution of the reservoirs, and provides fine characterization of the reservoirs.

Key words: waveform-indication-based inversion, Bayesian theory, carbonate reservoir, Ordovician, Tahe oilfield, Tarim Basin

收稿日期:2017-03-01;修订日期:2017-06-30。

第一作者简介:韩长城(1984—),男,博士研究生,碳酸盐岩油藏精细描述。E-mail:517892849@qq.com。

通讯作者简介:任丽华(1979—),女,副教授,碳酸盐岩油藏精细描述。E-mail:rlh-79@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009-001)。

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩溶储集体分布不均,储集体类型复杂,具有较强的非均质性^[1-3]。碳酸盐岩基质具有低孔、低渗的特点,储集空间主要为后期溶蚀作用形成的洞穴、孔洞和裂缝,根据储集体的形态和组合方式不同,将其分为溶蚀洞穴型、溶蚀孔缝型和裂缝型3类^[4]。缝洞储集体纵、横向变化快,规模大小不一,分布规律复杂,主要依靠地球物理资料进行缝洞储集体识别预测。但由于奥陶系埋深大,一般大于5 500 m,碳酸盐岩致密,地震波传播速度快^[5],反射信号弱,地球物理特性非常复杂,给地震勘探开发带来了很大困难。近年来,随着地球物理技术的发展,很多学者尝试利用多种地球物理方法对碳酸盐岩缝洞储集体进行了预测。诸如,正演模拟缝洞储集体反射特征,建立缝洞储集体形态及岩石物理参数与地震响应之间的关系^[6-7];利用地震属性预测缝洞体^[8-9],如振幅变化率属性、相干属性集多属性优化技术等均取得了较好效果;通过地震波形特征建立储集体和地震之间的响应关系^[10-11];利用波阻抗反演^[12]和地质统计学反演方法对缝洞储集体进行预测^[13-14]。这些研究成果均较好指导碳酸盐岩缝洞储集体勘探,但仍然存在较多问题,如地震属性多解性较强;波阻抗反演分辨率太低,无法满足小型缝洞体预测需求;测井约束反演高频分量主要来源于初始阻抗模型,多解性强;地质统计学反演随机性较强,对井位分布要求较高。地震波形指示反演是贝叶斯判别理论^[15-17]和马尔科夫链蒙特卡罗^[18-19]抽样算法实现的一种反演方法。在贝叶斯理论框架下,通过给定地质认识、测井解释等建立先验解空间,建立建议分布与先验解空间之间的关系,实现先验解空间的有效采样,采用 Metropolis-Hastings 抽样算法对后验概率分布抽样,选取目标函数最大值时的解作为可行随机实现,求取多次可行实现均值作为期望输出。该反演结果在纵向上分辨率得到提高,同时在横向上对储集体边界精细刻画。

1 反演方法原理

1.1 目标函数建立

根据贝叶斯条件概率定义,事件的后验概率公式为:

$$p(m|n) = \frac{p(n,m)}{p(n)} = \frac{p(n|m)p(m)}{\int p(n|m)p(m)dm} \propto p(m)p(n|m) \quad (1)$$

式中:

m ——模型参数,对应的先验分布为 $p(m)$,先验

分布 $p(m)$ 与观察数据 n 无关,主要由测井资料得到;

n ——与待求模型参数 m 有关的观测样本;

$p(n,m)$ —— m 和 n 的联合分布;

$p(n)$ —— n 发生的概率;

$p(n|m)$ ——似然函数,表示在模型参数 m 下的条件概率;

$p(m|n)$ ——在观察数据 n 下模型的后验概率。

一般由声波曲线所计算的波阻抗曲线是由两部分组成:

$$y = z + N \quad (2)$$

式中:

y ——由声波计算得到的波阻抗值, $g \cdot cm^{-3} \cdot m \cdot s^{-1}$;

z ——待求解的地下各地层的实际波阻抗值;

N ——背景噪音,一般情况下,假设背景噪音 N 服从高斯分布^[20],其均值为0。

由于 $(z - z_p)^2$ 与 N 一样均符合高斯分布,则目标函数可以表示为:

$$J_1(z) = \frac{\|z - z_p\|^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

式中:

z_p ——波阻抗 z 的期望值, z_p 主要通过选取的样本井的波阻抗曲线求得;

σ ——均方差。

波阻抗反演过程就是通过公式(3)研究 z 为何值时从而使 J_1 达到最小。波阻抗反演存在不稳定性或多解性,使用一种方法很难获得较理想解;同时由于地震资料带限宽度的限制,只能提供波阻抗反演的中频成分,而高频和低频成分则主要通过测井数据、地质信息获得^[21],因此可以用贝叶斯推理把反演问题与观测数据信息、模型信息以及先验信息联系起来,引入先验信息对其进行约束,从而获得较稳定的反演解^[22]。在贝叶斯理论下,具有先验信息条件时,经过贝叶斯推理,得到待反演模型参数的目标函数为:

$$J(z) = J_1(z) + \lambda^2 J_2(z) \quad (4)$$

式中:

z ——波阻抗, $g \cdot cm^{-3} \cdot m \cdot s^{-1}$ 。

$J_2(z)$ ——势函数的和,是与先验信息如测井资料、地质信息等有关的函数。

$J_1(z)$ ——与某些后验信息有关的函数。常数 λ 为平滑参数,用于协调 $J_1(z)$ 和 $J_2(z)$ 之间相互影响。

公式(4)进一步改写为:

$$J(z) = \frac{\|z - z_p\|^2}{2\sigma^2} + \lambda^2 \phi^k(z)$$

$$= \frac{\|z - z_p\|^2}{2\sigma^2} + \lambda^2 \sum_c \phi(D_c^k(z)/\delta) \quad (5)$$

式中:

ϕ ——势函数;

λ ——正规参数,一种平滑参数;

δ ——正规参数,一种刻度参数,调节不连续处调节梯度值。

先验项 $\phi^k(z)$ 中的 k 可取 1, 2, 3。当 $k=1$ 时表示先验项求和是在目标点最邻近的水平垂直方向所有区域进行。 $k=2, 3$ 时表示在平面或二次曲面上对邻近点之间的梯度矢量和 Hessian 矩阵求和^[21]。公式(4)由两部分组成,第一部分是关于测量模型和数据之间的某种一致性,当其值达到最小时,一致性会变得很好,但解稳定性变差;第二部分是关于解“光滑性”的测量标准,当其值取最小时,获得的近似解较稳定。

1.2 MCMC 方法和 Metropolis-Hastings 抽样准则

MCMC 方法是在贝叶斯框架下,用已有资料进行约束,既可使最优解满足参数的统计特性,同时融入了先验信息,解的精度得到提高^[23]。由于反演问题的非线性,后验分布常常没有显式的表达式,因此,引入 MCMC 方法对后验概率分布进行采样,从而获得参数的估计值。其基本思想是:通过构建一个平稳分布为 $\pi(x)$ 的马尔科夫链来获得 $\pi(x)$ 的样本,被估计的模型参数值是链的状态空间,被估计的后验分布为链的贝叶斯后验分布。

利用马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)方法对贝叶斯理论下的后验概率分布进行随机抽样,反演问题希望得到的是所估参数的后验概率分布,因此各个参数的马尔科夫链应收敛于所估计参数的后验概率分布^[24]。

设 M 为某一空间, n 为产生的总样本数, m 为马尔科夫链达到平稳时的样本数,则 MCMC 的思路为^[25]:

(1) 构建一条 Markov 链,使其收敛至平稳分布 $\pi(x)$,常用的构造转移核的是 Gibbs 抽样和 Metropolis-Hastings 抽样;

(2) 产生样本,由 M 中的某一点 $x^{(0)}$ 出发,用(1)中的 Markov 链进行抽样模拟,产生点序列 $x_1, \dots, x_n$;

(3) 蒙特卡罗积分。任一函数 $f(x)$ 的期望估计为

$$E[f(x)] = \frac{1}{n - m_l} \sum_{i=m_l+1}^n f(x^{(i)}) \quad (6)$$

式中:

n ——总样本数;

m ——马尔科夫链达到平稳时的样本数。

Metropolis-Hastings 抽样的基本思路^[12]是:选择一

转移函数 $q(x; x^{(i-1)})$ 和初始值 $x^{(0)}$, 若第 i 次迭代开始时的参数值为 $x^{(i-1)}$, 则第 i 次迭代过程为:

(1) 从 $q(x; x^{(i-1)})$ 中抽取一个备选值 x' ;

(2) 计算接受概率

$$\alpha(x^{(i-1)}, x') = \min \left\{ \frac{\pi(x^{(i-1)}; x')}{\pi(x^{(i-1)}) q(x'; x^{(i-1)})} \right\} \quad (7)$$

(3) 以概率 $\alpha(x^{(i-1)}, x')$, 置 $x^{(i)} = x'$, 以概率 $1 - \alpha(x^{(i-1)}, x')$, 置 $x^{(i)} = x^{(i-1)}$;

(4) 重复(1)——(3)步 n 次, 则可以得到后验样本 $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, \dots, x^{(n)}$ 。从而可计算后验分布的各阶矩以进行统计推理。

三维地震资料是分布密集的空间结构化数据,地震波形的横向变化反映不同沉积环境和岩性组合在空间上的变化规律。因此地震波形指示反演是在沉积学基本原理的基础上,利用地震波形相似性优选相关井样本,参照样本空间分布距离和曲线分布特征建立初始阻抗模型。同时通过对同一相带内声波阻抗曲线的分析,提出了“相截频率”,进一步拓宽频带分布,统计样本并纵波阻抗建立先验概率函数。将初始模型与地震波阻抗体进行匹配滤波,求得似然函数,对样本进行多尺度分解,逐步滤除高频成分;最后基于贝叶斯理论,联合似然分布与先验分布得到后验概率分布,并将其作为目标函数;基于波形指示优选的样本在空间上具有较好的相关性,采用 Metropolis-Hastings 抽样算法对后验概率分布抽样,选取目标函数最大值时的解作为可行随机实现,求取多次可行实现的均值作为期望输出。因此该反演方法在高频成分确定过程中充分利用了地震波形的横向变化特征,在提高垂向分辨率的同时,随机性减小。

2 应用实例

2.1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起中段的阿克库勒凸起西南端^[26],先后经历了加里东、海西、印支—燕山和喜马拉雅期构造升降运动,遭受多期剥蚀及岩溶作用。塔里木盆地奥陶系主要为一套台地相碳酸盐岩沉积,发育有下奥陶统蓬莱坝组、中—下奥陶统鹰山组、中奥陶统一间房组,上奥陶统切尔巴克组、良里塔格组、桑塔木组,主要目的层为中、下奥陶统的鹰山组 and 一间房组。鹰山组主要岩性为褐灰色泥微晶灰岩、白云质灰岩和灰质白云岩;一间房组主要岩性为灰色砂屑灰岩、生物灰岩和泥微晶灰岩等。加里东期和

海西期发生两期重要的构造运动,加里东中期第Ⅰ幕构造运动形成了一间房组顶面平行不整合面,主要发生大气淡水溶蚀作用;加里东中期Ⅱ幕构造运动,在良里塔格组与上覆桑塔木组形成角度不整合面,遭受强烈剥蚀;晚奥陶世末期,发生加里东中期Ⅲ幕,构造抬升,中、上奥陶统遭受剥蚀;海西早期构造运动幅度较大,抬升剥蚀较剧烈,形成大型不整合面,岩溶作用较强烈(图1)。

2.2 储集体类型及特征

通过对研究区13口井的岩心、薄片与录井等资料的观察分析,塔河油田奥陶系岩溶储层储集空间类型多样,主要包括孔隙、裂缝和大型溶洞。根据它们的组合关系不同,储集体类型主要有溶蚀洞穴型、裂缝-孔洞型和裂缝型3类^[4]。

溶蚀洞穴型储集体的储集空间多为未充填或半充填的大型洞穴系统。岩溶垮塌充填的沉积物中可见分选较差,棱角-次棱角状的灰岩角砾(图2a)。钻井过程中发生井漏和放空漏失,声波时差呈现明显“U”型高值,密度显著降低,中子孔隙度增大,电阻率曲线明显降低,深浅电阻率出现正幅值差,在泥质充填处自然伽马值升高,在地震剖面上表现为强的“串珠”状反射。裂缝-孔洞型储集体储集空间多为裂缝和溶蚀孔洞,孔洞多为沿先期裂缝、微裂隙、缝合线等局部溶蚀扩大形成,裂缝和溶孔对油气的储集、渗流都有重要的作用,后期多被方解石或有机质全充填-半充填(图2b,c)。常规测井曲线特征为:密度稍微降低,声波时差发生轻微跳变,电阻率值降低,在地震剖面上多

表现为杂乱反射特征。裂缝型储集体的储集空间是构造缝、溶蚀缝和成岩缝等。裂缝的成因主要受构造作用和成岩作用控制,经历多期次构造挤压作用,可见多组不同角度裂缝相互交叉形成裂缝网络。具有多期次发育特点,后期被方解石、有机质等充填-半充填,部分直立缝未充填,裂缝面存在油质(图2d,e)。

2.3 地震反射特征分析

在正演模拟和前人研究的基础上^[27-29],结合塔河油田碳酸盐岩储层实际地质情况及地震反射特征,将碳酸盐岩岩溶储集体的地震反射结构分为“串珠”状反射、杂乱反射和弱反射3类。

“串珠”状反射是塔里木盆地碳酸盐岩勘探和开发的主要研究对象,且已证实具有较好产能(图3a)。当碳酸盐岩缝洞与不整合面间距大于30 m时,溶洞与致密基岩之间会形成多次绕射,绕射波经过叠前偏移成像可在垂向上形成多个短轴强反射^[24]。通常是垂直洞穴、大型椭圆型储集体及多层储集体的响应特征。当风化壳表层储集体不发育,内幕储集体发育时,表现为表层强反射、内幕“串珠”状反射(图3b);当风化壳表层和内幕区储集体均发育时,且之间有较厚致密层隔挡时,表现为表层弱反射、内幕“串珠”状反射(图3c)。

杂乱反射常由一些连续性较差、方向不定、形状各异、振幅有强有弱的短同向轴组成。

当纵向厚度较小的孔洞和裂缝组成的横向随机分布孔洞储集体时,地震反射结构特征表现为强杂乱反射(图3d,e)。

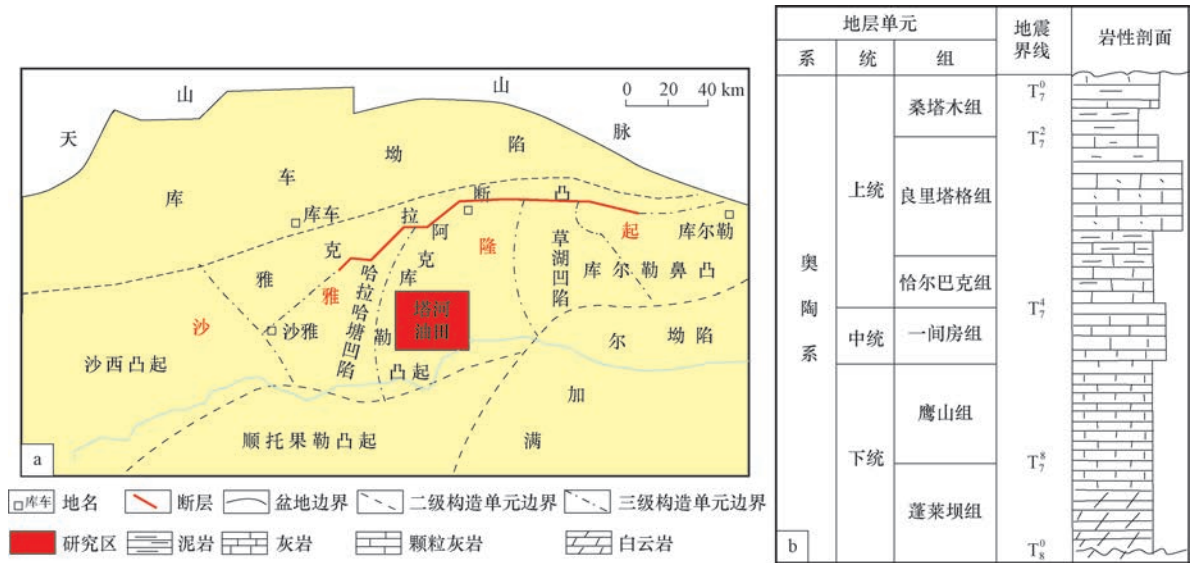


图1 塔河油田构造位置和地层综合柱状图

Fig. 1 Structure units and stratigraphic column in Tahe oilfield

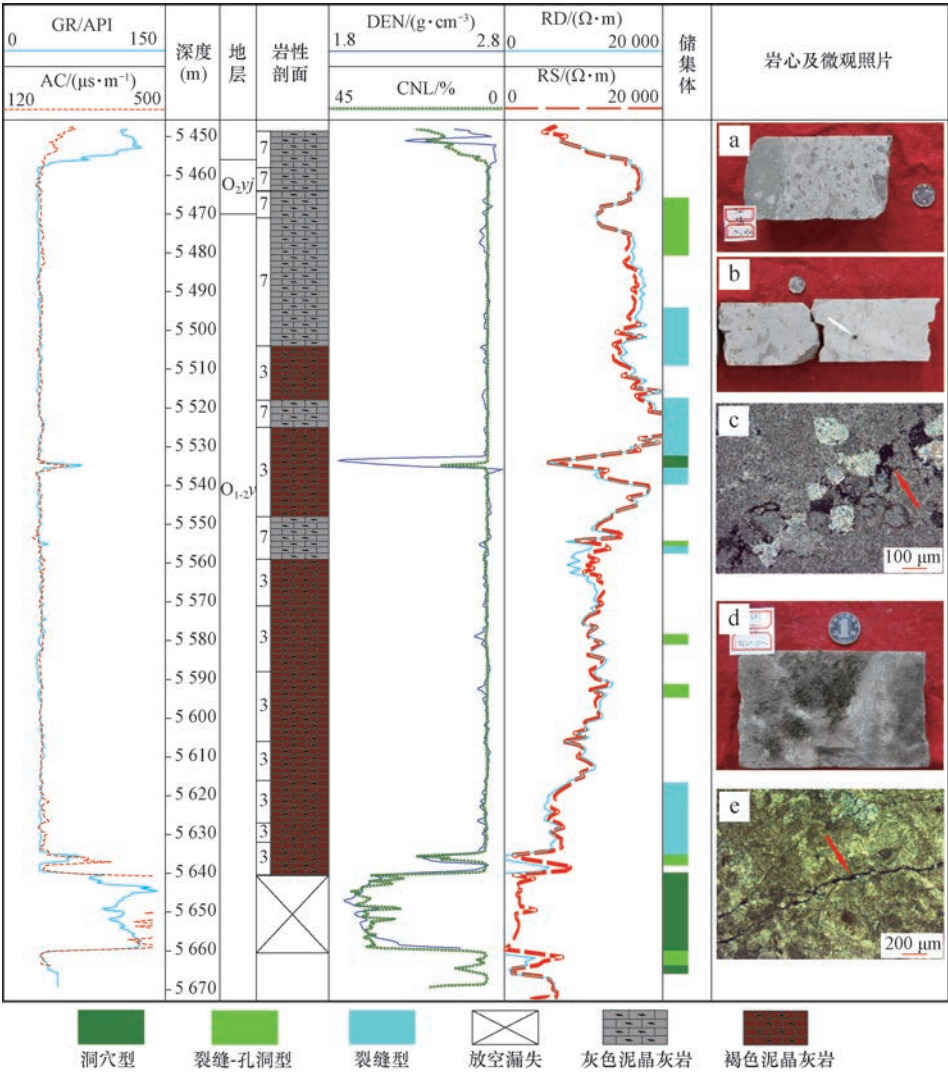


图 2 塔河油田 Tk210 井地层综合柱状图

Fig. 2 Composite columnar section of Well Tk210 in Tahe oilfield

弱反射在地震剖面上表现为振幅值小或空白的反射值。内幕区发育规模较小的孔洞型储集体、裂缝型储集体或缝洞储集体距风化壳距离较近时表现为弱反射特征(图 3f)。

2.4 储层岩石物理分析

首先对研究区测井资料进行标准化预处理,主要针对的是因测井仪器误差等原因导致测井数据出现的偏差。然后对测井资料进行统计分析,碳酸盐岩基岩致密,地震波传播速度和密度均较高,地震波的平均速度达到 6 000 m/s。地层中发育裂缝、溶孔和洞穴时导致声波时差明显增大、密度降低,即波阻抗值显著降低,同时深侧向电阻率也明显降低。因此波阻抗与储集体之间存在明显的对应关系。图 4 给出了不同储集体类型纵波阻抗与深侧向电阻率交汇分析结果。溶蚀洞穴型储集体波阻抗值最低,从 12 000 ~

15 500 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,裂缝-孔洞型储集体波阻抗值域为 14 100 ~ 16 400 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,裂缝型储集体波阻抗值较高,从 15 700 ~ 17 500 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,而碳酸盐岩基岩波阻抗值多为大于 17 000 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m/s}^{-1}$ 。因此波阻抗值能较好区分各类型储集体。

2.5 子波提取及频率参数设置

子波的提取主要采用循环迭代法。其提取流程为:利用地震道的自相关性计算初始子波的振幅谱和相位谱;利用振幅谱和相位谱的信息合成一个理论雷克子波,用理论子波合成的记录进行初步标定,提取井旁地震道实际地震子波,用该子波制作合成记录并重新调整时深关系。如此反复,直至得到相位振幅谱变化稳定的精细子波。地震数据的频带范围影响反演结果的分辨率。地震资料主频为 30 Hz,有效频带范围为 10 ~ 70 Hz,主要集中在中频范围;而反演中的低频信

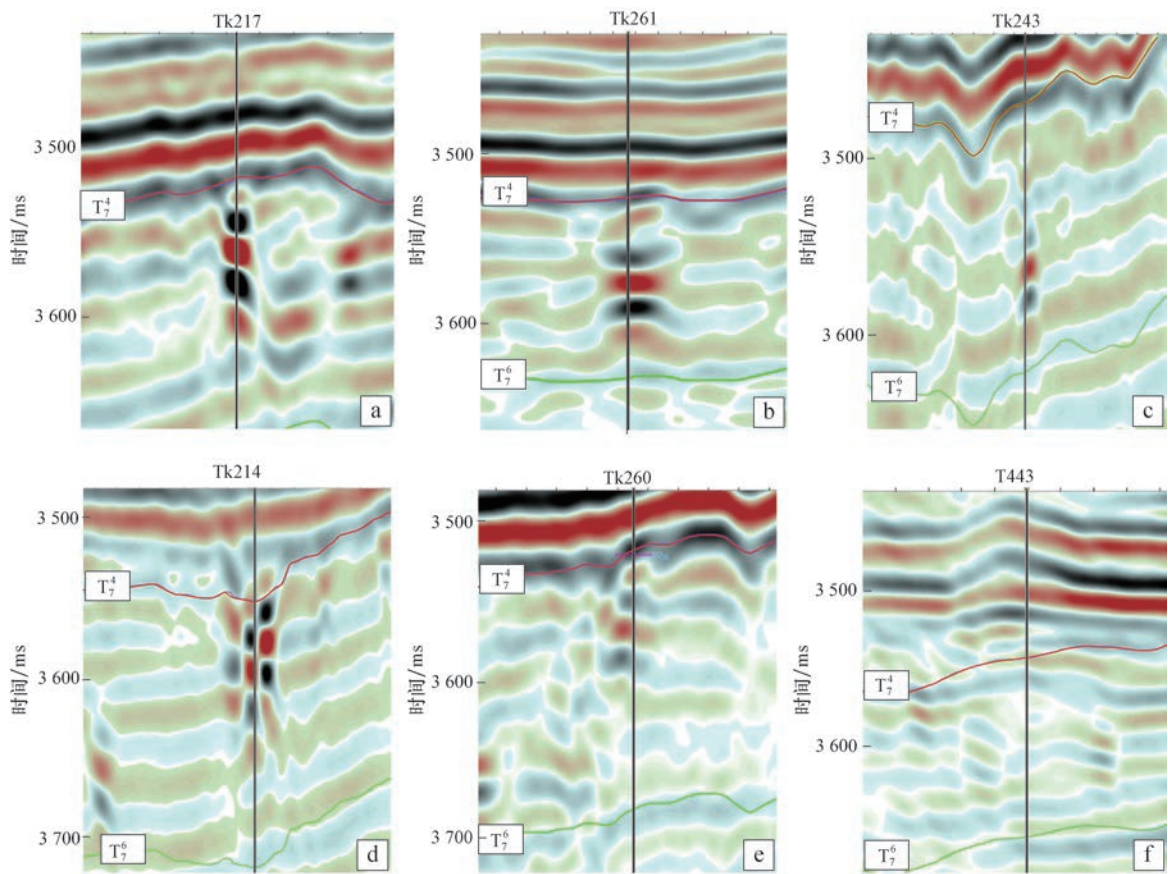


图3 塔河油田波形反射特征剖面
Fig.3 Seismic waveform reflection profiles of Tahe oilfield

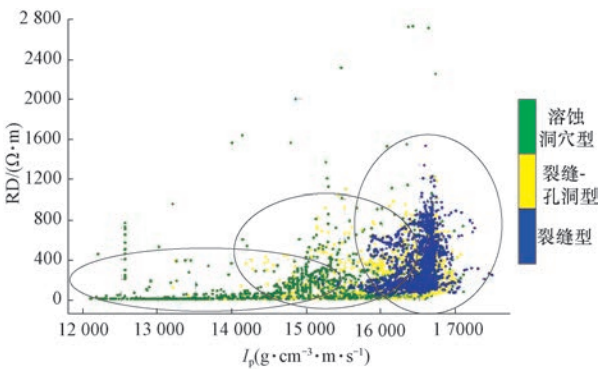


图4 塔河油田奥陶系储集体纵波阻抗与深
侧向电阻率测井值交汇图
Fig.4 Crossplot of P-wave impedance vs. RD of the
Ordovician reservoirs in Tahe oilfield

息和 高频信息主要由测井曲线提供。因此在地震波形指示反演中,低频成分主要从测井资料中获取,中频成分通过地震资料求取,高频成分是在地震波形指示下进行的随机模拟结果,整个过程是由确定到随机的逐步过渡,随机成分较少。本次反演的低频参数和 高频参数优选如下:低频参数中高通频率取 6 Hz,高截频率取 10 Hz;高频参数中低截频率取

60 Hz,低通频率取 80 Hz,高通频率取 200 Hz,高截频率取 250 Hz。

2.6 反演效果分析

通过对塔河油田的地质、地震以及测井等资料分析,确定了碳酸盐岩储集体类型及对应的地震反射波特征,得到了岩石物理参数模型。在贝叶斯理论上,以地质认识、测井数据和地震解释层位作为先验信息来约束反演结果,综合其概率密度函数得到岩溶储集体发育情况的后验概率分布函数,即缝洞储集体的空间发育规律。图 5a 是原始地震剖面、测井约束反演和波形指示反演结果。在原始剖面上,缝洞储集体为大片的“串珠”状强震幅反射以及弱振幅反射,能大概确定储集体分布的位置,但对纵向上储集体的叠置关系、横向上储集体的边界范围以及储集体的具体形状无法确定。

测井约束地震反演是基于模型的反演,从图 5b 中可以看出,在井点处反演结果垂向分辨率较高,但由于其初始波阻抗模型是由井资料内插和外推实现的,其横向连续性较好。但塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞储

集体埋藏深度大,储集体分布受断裂、岩溶作用等多因素控制,储集体形态复杂,纵横向分布变化快,非均质性极强,因此对于碳酸盐岩缝洞型储集体这类横向变化较快的储层,测井约束地震反演井间预测较好较差。地震波形的横向变化可以较好的反映缝洞储集体横向变化规律,不同地震反射特征所反映的储集体的类型不同,如大型溶洞储集体多为“串珠”状反射,而杂乱反射多为裂缝-孔洞型储集体,弱反射多为裂缝发育带。因此在反演过程中基于地震波形特征优选样本,利用样本井的原始数据和空间结构特点,对未知样点

进行线性无偏、最优估计。在地震波形约束条件下,有效的提高高频信息,反演结果能较好地地区分各类储集体的空间分布规律(图5c)。波阻抗值低的部分(即波阻抗值小于 $15\,500\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 部分)为规模较大、物性较好的溶洞型储集体。对于非溶洞型储集体,波阻抗变化主要反映在物性差异上,波阻抗值较低处为裂缝-孔洞型储集体(即波阻抗值域为 $14\,100\sim 16\,400\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),如 Tk211 井测井解释在表层发育一段大约 30 m 的裂缝-孔洞型储集体,在地震剖面上无法看出,而反演剖面上有较好的反应。裂缝型储集体主

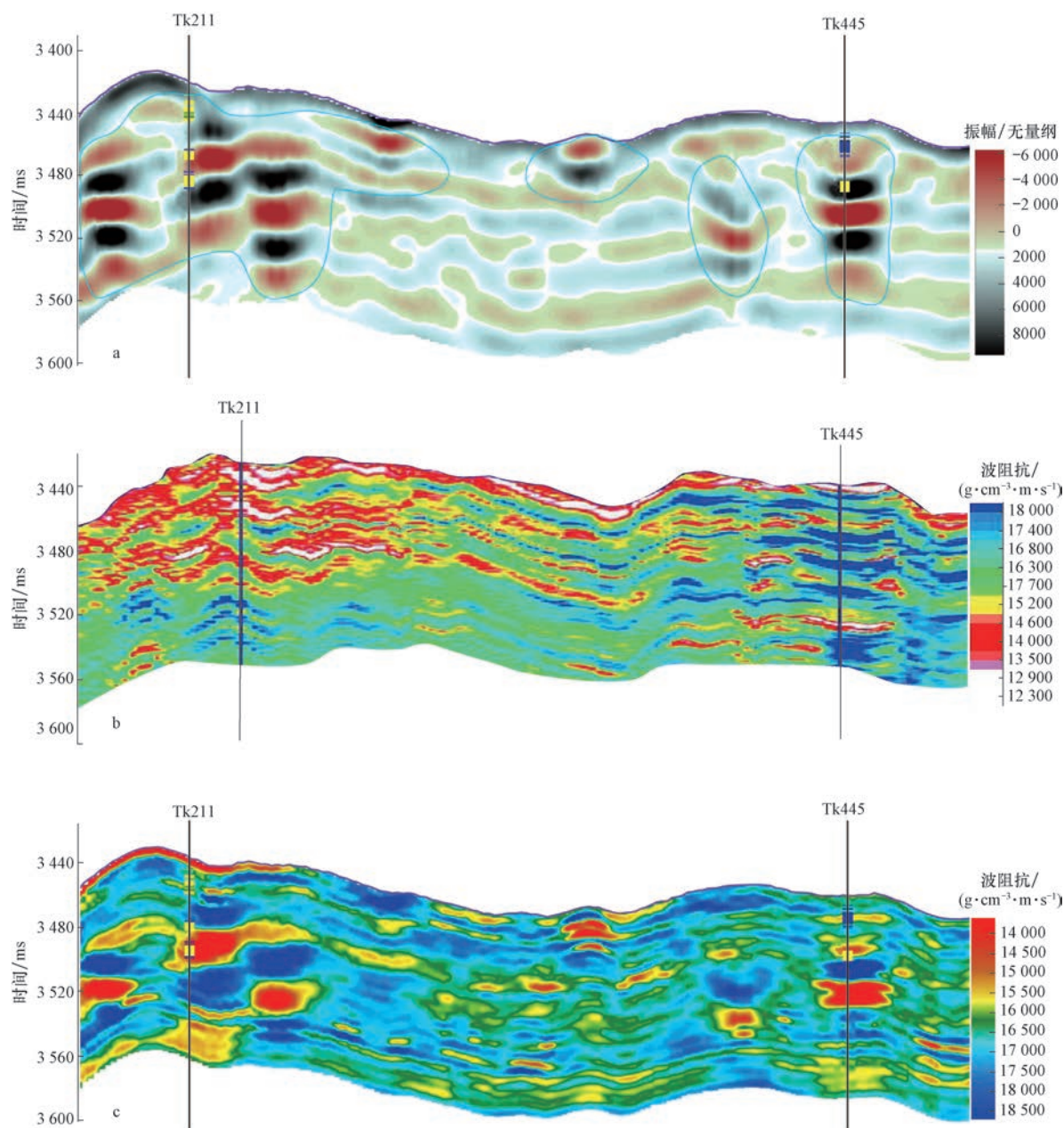


图5 塔河油田过 Tk211—Tk445 井地震剖面波和反演剖面

Fig. 5 Seismic and inversion sections crossing Tk211 and Tk445 wells in Tahe oilfield

a. 原始地震剖面; b. 测井约束波阻抗反演剖面; c. 波形指示反演剖面

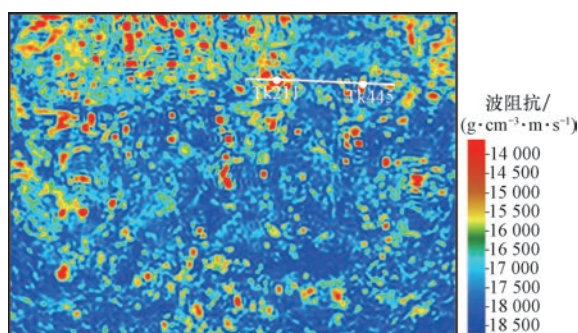


图6 塔河油田波形指示反演结果平面属性

Fig. 6 Map showing waveform-indication-based inversion results in Tahe oilfield

要是波阻抗值较高部分,主要发育在风化壳表层和构造变形部位。波阻抗值最高处为碳酸盐岩基岩部分,在反演剖面上主要为蓝色-浅蓝色部分。在反演平面图上也可以看出缝洞储集体多为管道状暗河和孤立型溶洞,在溶洞周围有孔洞-裂缝型储集体发育,储集体主要分布在研究区的北部(图6)。缝洞储集体横向分布较自然,与地质认识相符。

3 结论

1) 波形指示反演是在贝叶斯框架下,通过建立建议分布与先验解空间之间的关系,实现先验解空间的有效采样,然后采用 Metropolis-Hastings 抽样算法对后验概率分布抽样,从而实现的新型波阻抗反演方法。该过程中地质认识及测井资料起着软约束作用,在尊重地震本身趋势的情况下,根据波形特征储集体纵向分辨能力得到提高的波阻抗数据体,更加突出了地震资料在井间储集体预测作用。

2) 缝洞碳酸盐岩储集体非均质性强,分布规律复杂,储集体预测识别一直是一个难题。溶蚀洞穴型储集体规模较大,物性好,利用该方法识别效果较好,裂缝-孔洞型储集体多是成带分布,也能较好的识别;裂缝型储集体与基岩的波阻抗值差异较小,预测结果准确性仍需要进一步确定。同时由于引入的高频信息是在波形指示下进行的随机模拟,因此,需要注意样本井的选取和高频信息的选取。

参 考 文 献

[1] 韩长城,林承焰,鲁新便,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):644-652.
Han Changcheng, Lin Chengyan, Lu Xinbian, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbona-

te karst slope of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 644-652.

- [2] 刘立峰,孙赞东,杨海军,等. 缝洞型碳酸盐岩储层地震属性优化方法及应用[J]. 石油地球物理勘探,2009,44(6):747-754.
Liu Lifeng, Sun Zandong, Yang Haijun, et al. Seismic attribute optimization method and its application for fractured-vuggy carbonate reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 747-754.
- [3] 张学丰,李明,陈志勇,等. 塔北哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征及主要岩溶期次[J]. 岩石学报,2012,28(3):815-826.
Zhang Xuefeng, Li Ming, Chen Zhiyong, et al. Characteristics and karstification of the Ordovician carbonate reservoir, Halahatang area, north Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 815-826.
- [4] 韩长城,林承焰,任丽华,等. 塔里木盆地塔河10区奥陶系断裂特征及对岩溶储层的控制作用[J]. 天然气地球科学,2016,27(5):790-798.
Han Changcheng, Lin Chengyan, Ren Lihua, et al. Characteristics of Ordovician fault in the Block 10 of Tahe Oilfield, Tarim Basin and its controlling effect on karst reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 790-798.
- [5] 赵裕辉,胡建中,鲁新便,等. 碳酸盐岩缝洞型储集体识别与体积估算[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(5):720-724.
Zhao Yuhui, Hu Jianzhong, Lu Xinbian, et al. Identification of carbonate fractured-vuggy reservoir and volume estimation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 720-724.
- [6] 马灵伟,顾汉明,李宗杰,等. 正演模拟碳酸盐岩缝洞型储层反射特征[J]. 石油地球物理勘探,2015,50(2):290-297.
Ma Lingwei, Gu Hanming, Li Zongjie, et al. Simulation of carbonate fracture-cavern reservoir reflection characteristics with forward modeling[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(2): 290-297.
- [7] 李倩,狄帮让,魏建新. 碳酸盐岩储层孔洞体积的地震物理模拟估算[J]. 石油地球物理勘探,2014,49(6):1147-1156.
Li Qian, Di Bangrang, Wei Jianxin. Carbonate reservoir cave volume estimation with seismic physical simulation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(6): 1147-1156.
- [8] 韩革华,漆立新,李宗杰,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):860-870.
Han Gehua, Qi Lixin, Li Zongjie, et al. Prediction of the Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 860-870.
- [9] 王光付. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法[J]. 石油学报,2008,29(1):47-51.
Wang Guangfu. Integrative identification and prediction methods for carbonate rock cave reservoir[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 29(1): 47-51.
- [10] 温志新,王红漫,漆立新,等. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层预测研究[J]. 地学前缘,2008,15(1):94-100.
Wen Zhixin, Wang Hongman, Qi Lixin, et al. Research on the prediction of Ordovician carbonate reservoir of fissure-cave type in the Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 94-100.
- [11] 罗亚能,黄捍东,王玉梅,等. 地震波形反演与测井联合的三维建模方法[J]. 石油地球物理勘探,2016,51(5):947-954.

- Luo Yaneng, Huang Handong, Wang Yumei, et al. Three-dimensional modeling based on integration of full wave inversion and well logging data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(5): 947–954.
- [12] 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.
- [13] 孙炜, 王彦春, 李玉凤, 等. 基于地质统计学反演的碳酸盐岩孔隙洞预测研究[J]. 现代地质, 2012, 26(6): 1258–1264.
- Sun Wei, Wang Yanchun, Li Yufeng, et al. Fractures and solution pore prediction in carbonate reservoirs based on geo-statistics inversion[J]. Geoscience, 2012, 26(6): 1258–1264.
- [14] 韩东, 胡向阳, 邬兴威, 等. 基于地质统计学反演的缝洞储集体物性定量评价[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 655–661.
- Han Dong, Hu Xiangyang, Wu Xingwei, et al. Quantitative evaluation for porosity of the fracture-cavity reservoir based on geostatistical inversion[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 655–661.
- [15] 徐旺林, 张繁昌, 郭彦如, 等. 贝叶斯全频信息同时反演在鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 723–728.
- Xu Wangling, Zhang Fanchang, Guo Yanru, et al. Bayesian full frequency simultaneous inversion for carbonate reservoir in Erdos Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(4): 723–728.
- [16] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 地震波形指示反演在东营凹陷王家岗地区沙四上亚段滩坝砂的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2017, 41(2): 60–69.
- Han Changcheng, Lin Chengyan, Ren Lihua, et al. Application of seismic waveform inversion in Es_{4s} beach-bar sandstone in Wangjiagang area, Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(2): 60–69.
- [17] 张繁昌, 肖张波, 印兴耀. 地震数据约束下的贝叶斯随机反演[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 176–182.
- Zhang Fanchang, Xiao Zhangbo, Yin Xingyao. Bayesian stochastic inversion constrained by seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1): 176–182.
- [18] 王芳芳, 李景叶, 陈小宏. 基于马尔科夫链先验模型的贝叶斯岩相识别[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 183–189.
- Wang Fangfang, Li Jingye, Chen Xiaohong. Bayesian facies identification based on Markov-chain prior model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1): 183–189.
- [19] 韩东, 胡向阳, 邬兴威, 等. 基于马蒙算法地质统计学反演的缝洞储集体预测[J]. 物探与化探, 2015, 39(6): 1211–1216.
- Han Dong, Hu Xiangyang, Wu Xingwei, et al. The prediction research on fracture-cavity reservoirs by geostatistical inversion based on Markov Chain and Monte-Carlo algorithm in the Taheoilfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1211–1216.
- [20] Rimstad K, More H. Impact of rock-physics depth trends and Markov random fields on hierarchical Bayesian lithology/fluid prediction[J]. Geophysics, 2010, 75(4): R93–R108.
- [21] 张宏兵, 杨长春. 正则参数控制下的波阻抗约束反演[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 827–834.
- Zhang Hongbing, Yang Changchun. A constrained impedance inversion method controlled by regularized[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 827–834.
- [22] 宋维琪, 朱海伟, 姜宇东, 等. 地面微地震资料震源定位的贝叶斯反演方法[J]. 石油物探, 2013, 52(1): 11–16.
- Song Weiqi, Zhu Haiwei, Jiang Yudong, et al. Bayesian inversion method for surface monitoring microseismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(1): 11–16.
- [23] 张宏兵, 尚作萍, 杨长春, 等. 波阻抗反演正则参数估计[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 181–188.
- Zhang Hongbing, Shang Zuoping, Yang Changchun, et al. Estimation of regular parameters for the impedance inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 181–188.
- [24] 张广智, 王丹阳, 印兴耀. 利用 MCMC 方法估算地震参数[J]. 石油地球物理勘探, 2011(4): 605–609.
- Zhang Guangzhi, Wang Danyang, Yin Xingyao. Seismic parameter estimation using Markov Chain Monte Carlo Method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011(4): 605–609.
- [25] 朱新玲. 马尔科夫链蒙特卡罗方法研究综述[J]. 统计与决策, 2009(21): 151–153.
- Zhu Xinling. Review on the research of Markov Monte Carlo method[J]. Statistics & Decision, 2009(21): 151–153.
- [26] 鲁新便, 高博禹, 陈姝媚. 塔河油田下奥陶统碳酸盐岩古岩溶储层研究—以塔河油田6区为例[J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 87–92.
- Lu Xinbian, Gao Boyu, Chen Shumei. Study on characteristics of paleokarst reservoir in lower Ordovician carbonate of Tahe Oilfield[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(1): 87–92.
- [27] 杨子川, 李宗杰, 窦慧媛. 储层的地震识别模式分析及定量预测技术初探—以塔河油田碳酸盐岩储层为例[J]. 石油物探, 2007, 46(4): 370–377.
- Yang Zichuan, Li Zongjie, Dou Huiyuan. Seismic recognition model analysis and probe of quantitative reservoir prediction technology: case study of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. GPP, 2007, 46(4): 370–377.
- [28] 许杰, 赵永勤, 杨子川. 应用波形分析技术预测塔河油田缝洞型储集层[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 756–760.
- Xu Jie, Zhao Yongqin, Yang Zichuan. Waveform analysis technique and fissure-cavity reservoir prediction in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 756–760.

(编辑 董立)