

天然气勘探

滨里海盆地盐下碳酸盐岩储层 地震逐级预测方法

杨勤林^{1,2}, 张 静², 郝 涛², 张亚军², 李国斌²

(1. 中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院, 江苏 南京 210014;

2. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:滨里海盆地在盐下石炭系发育台地相碳酸盐岩,以裂缝—孔隙型储层为主,非均质性强,具有岩性复杂多样、储层物性和厚度变化快、单层厚度小的特征。针对这些难点,提出了随机地震反演和地质统计学协模拟实现储层的岩性和物性逐级预测。首先采用基于马尔科夫链—蒙特卡罗算法(MCMC)的随机地震反演获得高分辨率波阻抗和岩性反演结果,然后通过云变换方法分岩性建立波阻抗和孔隙度关系,并结合地质统计学协模拟对储层的孔隙度进行预测。反演结果纵向分辨率高,能识别2m以内的薄储层,同时井间横向变化合理,真实地反映了碳酸盐岩储层变化特征。该方法能解决类似非均质性薄储层预测的地质问题。

关键词:滨里海盆地;台地相碳酸盐岩;随机地震反演;马尔科夫链—蒙特卡罗算法;地质统计学协模拟

中图分类号:TE132.1⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2014)08-1261-06

引用格式:Yang Qinlin, Zhang Jing, Hao Tao, *et al.* Seismic stepped prediction methods of sub-salt carbonate reservoirs in Pre-Caspian Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1261-1266. [杨勤林, 张静, 郝涛, 等. 滨里海盆地盐下碳酸盐岩储层地震逐级预测方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1261-1266.]

0 引言

滨里海盆地主要位于哈萨克斯坦境内,为世界上特大型含油气盆地,现已发现了阿斯特拉汗、田吉兹、扎纳诺尔以及北特鲁瓦等大型油气田,表明该盆地拥有极其丰富的油气资源^[1]。盆地最大的特点是在下二叠统孔谷阶发育巨厚盐层,最大厚度达到2 000m,而主要的油气产层为盐下石炭系的碳酸盐岩地层。巨厚盐丘严重影响盐下地震资料的品质,随着叠前深度偏移技术的应用已逐步得到改善,并能够满足地震储层预测的要求^[2-4]。盐下地震勘探的另外一个难点是碳酸盐岩储层非均质性强,主要为裂缝—孔隙型,具有岩性复杂多样、储层物性和厚度变化快、单层厚度小的特征,储层预测难度大。

由于地震资料本身频带限制,缺少高频和低频信息,常规确定性反演方法如约束稀疏脉冲反演和基于模型反演等,需要对其进行相应补充。基于模型的地震反演方法,主要依靠测井资料的高频信息和完整的低频成分补充地震有限带宽的不足,但如果过分强调分辨率时其模型化比较重;约束稀疏脉冲反演结果能忠实于原始地震资料,但受地震频带宽度的限制,分辨率相对较低,而且只能获得波阻抗信息^[5-9]。随机地震反演是一种将随机模拟与地震反演相结合的反演方法,综合测井和地质信息分析储层参数的概率分布,通过随机模拟方法构建一系列等概率的储层参数模型,并加入地震资料约束,在多个模型中选取正演记录与地震数据最佳匹配的模型作为反演结果。它的优势在于不依赖于初始模

收稿日期:2013-10-24;修回日期:2013-12-17.

基金项目:中国石化股份有限公司石油物探技术研究院与技术开发项目(编号:2008E-1606)资助.

作者简介:杨勤林(1980-),男,湖北潜江人,工程师,博士,主要从事地震资料解释、储层预测研究. E-mail: yql612@163.com.

型,在提高地震资料垂向分辨率的同时充分考虑地下地质的随机特性,使反演结果既忠实于地震又能够符合实际地质情况^[10-11]。

目前常用的随机模拟方法主要是序贯指示模拟,它采用逐点模拟和局部求解并进行优化的方式,当网格被全部填充即得到近似结果,因此需要耗费大量的计算时间,而且这种局部寻优求解在统计学意义上不是严格正确的^[12-14]。针对上述反演方法存在的问题和非均质性碳酸盐岩储层特点,本文采用马尔科夫链—蒙特卡罗算法随机地震反演和地质统计学协模拟方法实现了储层的波阻抗、岩性和物性逐级预测。

1 方法原理

1.1 基于马尔科夫链—蒙特卡罗算法的随机地震反演

马尔科夫链—蒙特卡罗算法的随机地震反演,将反演过程转换为一个利用先验信息和正演理论建立后验概率分布,采用 MCMC 算法对后验概率分布采样的过程,并可以加入岩性信息实现岩性和波阻抗联合反演^[15],能够解决全局优化和快速求解问题。先验概率分布通过测井参数的地质统计分析得到,包括直方图分析和变差函数分析等,初步构建一个模型参数满足条件概率分布。

所谓的后验概率分布指加入地震资料约束的概率分布,可以根据贝叶斯公式用先验概率分布和似然函数计算得到^[16-17]:

$$p(z_p | v_{zp}, s) \propto p(s | z_p) p(z_p | v_{zp})$$

式中: z_p 为波阻抗; s 为地震记录; v_{zp} 为波阻抗的变差函数; $p(z_p | v_{zp})$ 表示满足变差函数波阻抗 v_{zp} 的先验概率分布;后验概率分布 $p(z_p | v_{zp}, s)$ 表示在变差函数是 v_{zp} 且地震记录为 s 的条件下,波阻抗模型为 z_p 的概率。 $p(s | z_p)$ 称为似然概率分布,即当地下波阻抗模型为 z_p 时,采集得到地震记录 s 的概率,它以概率的形势描述了模型 z_p 正演得到合成记录与地震记录 s 的匹配程度,这个概率分布的不确定性由地震记录的信噪比控制。上述表达式只考虑了一种岩性,当存在多种岩性时,可以分不同岩性进行统计建立相应的关系式。

如何得到满足后验概率分布的预测结果,计算本质上就是对其进行高维积分,但在实践中,由贝叶斯推断和分析得到储层参数的后验概率分布多为高维、复杂的非常见分布,对这些高维积分进行计算十分困难。马尔科夫链—蒙特卡罗算法(MCMC)通

过模拟的方式对高维积分进行计算,使原本复杂的计算问题迎刃而解,它的基本思想是建立一条 Markov 链对未知变量进行模拟,当链达到平稳分布时即得到采样结果,然后让条马尔科夫链不断延伸,当其长度达到一定数目后,对应的状态近似为目标概率分布的样本结果。

1.2 云变换和地质统计学协模拟

地质统计学协模拟是在波阻抗和岩性反演基础上,进行的地质统计学协模拟和反演相结合的同步处理技术。首先根据测井解释结果生成储层参数曲线,比如孔隙度、含油饱和度等,进行变差分析和函数拟合,得到其空间变化的函数。通过纵波阻抗、岩性和物性参数进行交会分析得到对应的阻抗概率分布表,并对波阻抗数据体处理得到空间物性参数出现机会的概率体,并作为趋势约束,结合拟合的空间变化函数,通过大量的地质统计模拟得到多个等概率的储层参数数据体,进行分析筛选和处理得到最终反演结果。

云变换主要是用来描述 2 个参数之间的相互关系。如图 1 所示,对于同一种岩性来说,孔隙度与波阻抗一般存在反比关系,但不是简单的线性关系,即某一个波阻抗值对应的孔隙度是一个区间范围,有多种可能性,基于云变换的协模拟方法,将可能区间范围内的所有孔隙度值都考虑进来,作为一个孔隙度的概率分布,能更加客观地反映真实的储层属性特征。

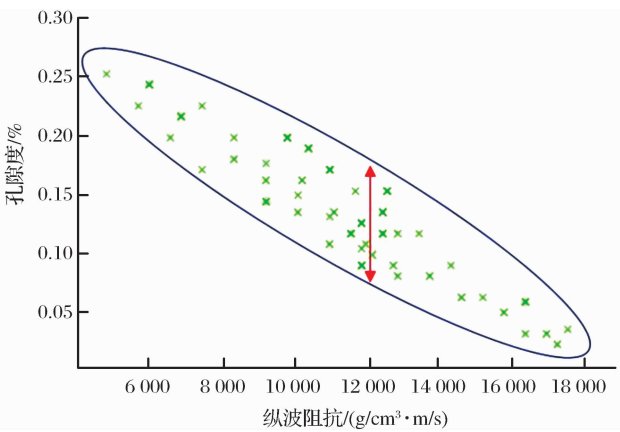


图 1 纵波阻抗与孔隙度的关系(云变换)

Fig. 1 Relationship between P-impedance and porosity (cloud transform)

2 应用实例及效果分析

根据钻井和地质资料分析,滨里海盆地 M 区块盐下目地层岩性包括泥岩、灰岩、膏岩、泥质灰岩和

白云岩等,主要储层为高孔隙的灰岩和白云岩。由于受原始沉积环境和后期改造作用等多重因素的影响,导致储层横向物性和厚度变化快,非均质性强,单层最小厚度在 2m 以内。

2.1 测井响应特征分析

图 2(a)中将纵波阻抗与 GR 曲线进行交会,反映出储层、泥(灰)岩和致密灰岩在纵波阻抗上有较大的重叠区域,直接利用波阻抗很难区分储层与非储层,但自然伽马可以较好地先把泥岩区分开来,即当 $GR > 80 \text{ API}$ 时对应的主要为泥岩,其他则为灰岩或白云岩等。在泥岩被区分以后,纵波阻抗能大致反映储层和致密灰岩,表现为相对低的纵波阻抗 ($8\,000 \sim 12\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) 对应储层段。

图 2(b)中将纵波阻抗与孔隙度进行交会,并以

泥质含量曲线作为颜色指示,可以看出,当泥质含量 $V_{sh} < 0.2$ 时,纵波阻抗与孔隙度具有较好的对应关系,即低纵波阻抗对应高孔隙度,高波阻抗对应低孔隙度,而当 $V_{sh} > 0.2$ 时,孔隙度值一般很小,对应的岩性主要为泥(灰)岩。

2.2 地震反演逐级预测

根据测井分析结果,可以采用“分步反演、逐级预测”思路,利用马尔科夫链—蒙特卡罗算法的随机地震反演获得波阻抗和岩性预测结果,在此基础上,再通过云变换分析不同岩性波阻抗和孔隙度关系,结合地质统计学协模拟预测储层孔隙度。其中定义泥质含量 $V_{sh} > 0.2$ 为泥岩,其他为灰岩和白云岩,分不同岩性统计对应的波阻抗概率密度函数和变差函数,并分别建立孔隙度与波阻抗关系(图 3)。

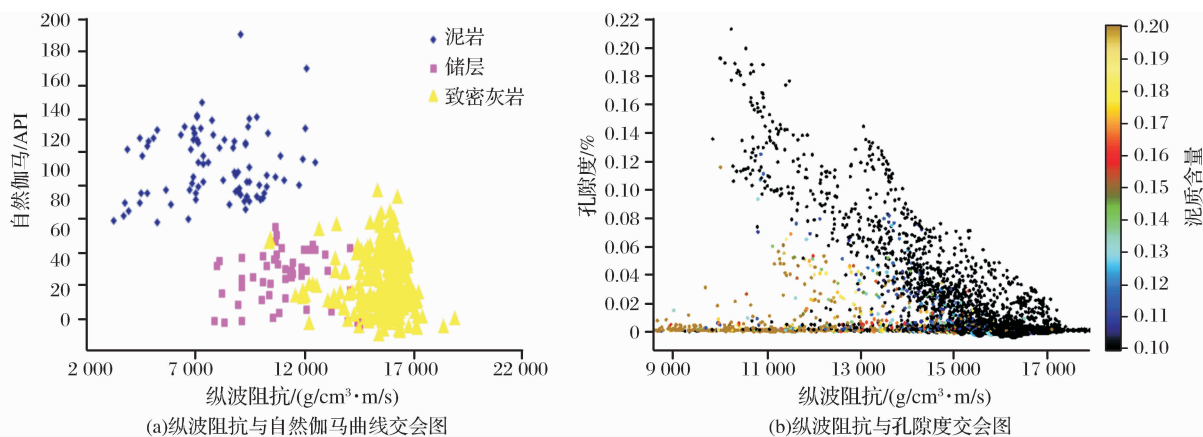


图 2 测井响应特征分析

Fig. 2 Analysis of logging response characteristics

2.3 反演效果分析

图 4 为 3 种反演方法的波阻抗剖面对比,井点插入的测井曲线是波阻抗曲线,泥(灰)岩在波阻抗上表现为低值,储层和致密灰岩波阻抗为相对高值。

图 4(a)约束稀疏脉冲反演剖面忠实于原始地震资料,横向变化自然,井点处波阻抗的纵向变化趋势与测井曲线基本一致,但分辨率低,缺少薄层信息。

图 4(b)模型反演波阻抗剖面的纵向分辨率高,井点处薄层的波阻抗对应关系较好,但模型化相对较重,横向变化趋势不合理,不能真实地反映出碳酸盐岩储层非均质性变化特征。

图 4(c)随机地震反演的波阻抗剖面,纵向分辨率高,含有丰富的储层细节信息,与测井资料完全吻合,横向上较好地反映了非均质储层波阻抗变化特征。储层岩性和孔隙度反演剖面,同样具有较高的

纵向分辨率,横向变化自然,剖面地质信息丰富,与测井资料一致(图 5)。

3 结论

(1)随机地震反演方法充分考虑了地下介质的随机特性,将随机模拟和地震反演有机结合,通过大量的等概率随机模拟和地震资料控制,预测结果与地震、测井和地质信息相吻合。相比基于模型的地震反演和约束稀疏脉冲反演,具有较高的纵向分辨率,同时横向变化自然,能反映井间储层的非均质性变化特征。

(2)采用基于马尔科夫链—蒙特卡罗算法的随机反演具有全局寻优和快速收敛的能力,分不同岩性的地质统计参数分析和随机反演可以获得高分辨率的波阻抗和岩性等数据。云变换客观地分析波阻抗与储层参数的关系,在随机地震反演基础上,应用

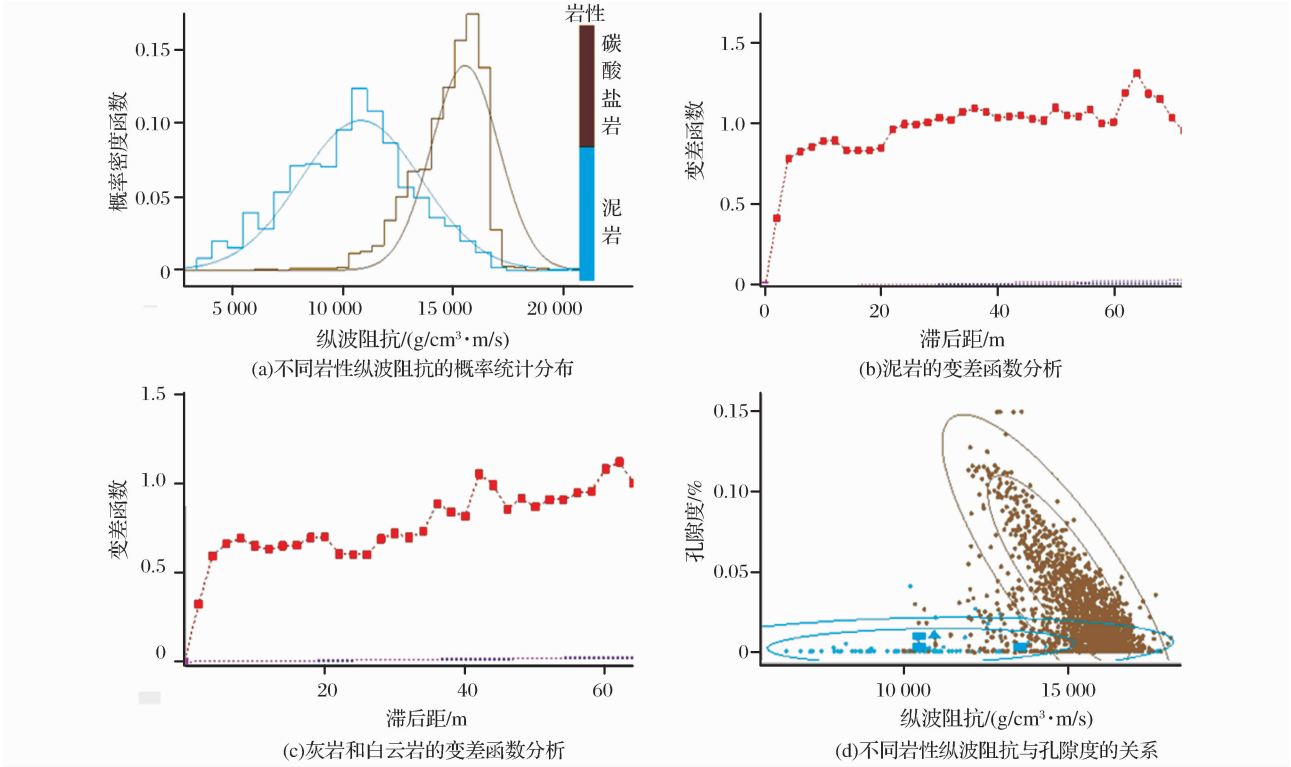


图 3 地质统计学参数分析

Fig. 3 Analysis of geostatistics parameters

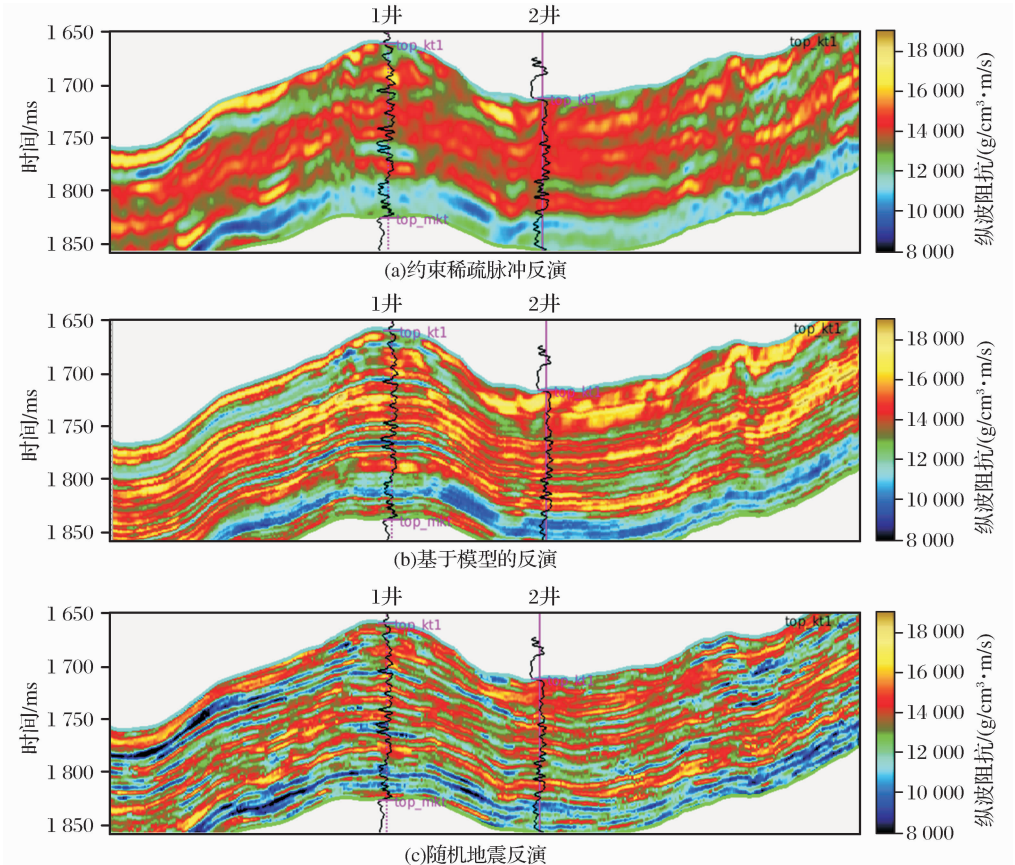


图 4 3 种反演的波阻抗剖面对比

Fig. 4 Impedance comparison sections of three kinds of inversion methods

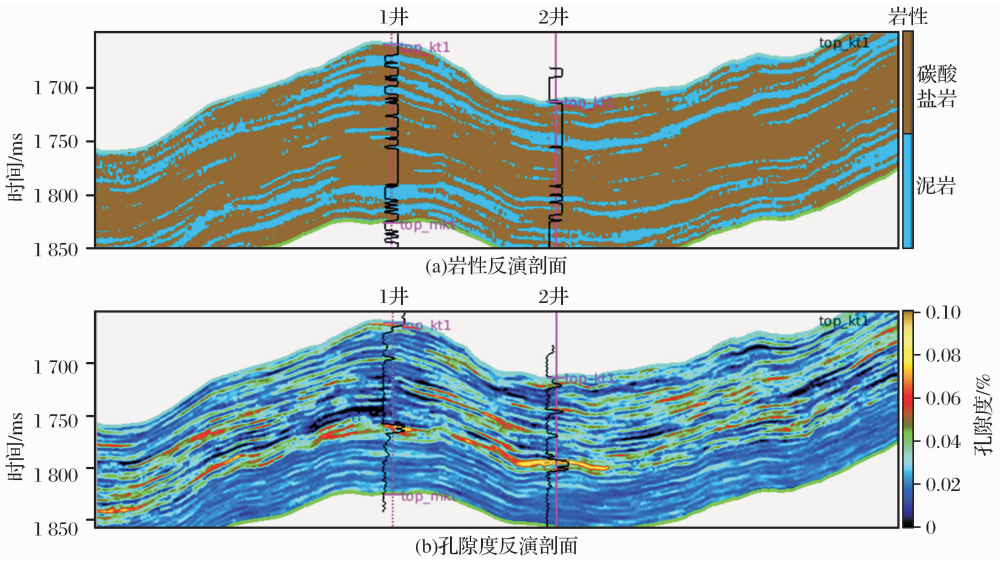


图 5 随机地震反演的岩性和孔隙度剖面

Fig. 5 Lithology and porosity sections of stochastic seismic inversion

地质统计学协模拟方法进一步实现了对储层物性参数的预测。这种“分步反演,逐级预测”的思路减少了反演的多解性,同时提高了反演预测精度。

参考文献 (References):

[1] Qian Guihua, Oil-gas geological feature and its exploration direction in marginal Caspian Basin Kazakhstan[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(5): 60-66. [钱桂华, 哈萨克斯坦滨里海盆地油气地质特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(5): 60-66.]

[2] Chen Bo, He Wenhua, Wu Lingang, et al. Practice and knowledge of sub-salt seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(supplement1): 90-92. [陈波, 何文华, 吴林钢, 等. 盐下地震勘探实践和认识[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(增刊 1): 90-92.]

[3] Wang Xiaowei, Yao Yao, Liu Wenqing, et al. Application of wave equation prestack migration in carbonate imaging[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 874-877. [王小卫, 姚姚, 刘文卿, 等. 波动方程叠前偏移在碳酸盐岩成像中的应用研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 874-877.]

[4] Liu Wenqing, Wang Yuchao, Yong Xueshan, et al. Pre-stack reverse time migration on GPU/CPU co-parallel computation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(5): 712-716. [刘文卿, 王宇超, 雍学善, 等. 基于 GPU/CPU 叠前逆时偏移研究及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(5): 712-716.]

[5] Xu Huiqun, Gui Zhixian. Application of Jason inversion to prediction of sandstone [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(4): 547-551. [许辉群, 桂志先. 利用测井约束地震反演预测砂体展布——以 YX 地区砂四段三砂组砂体为例[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(4): 547-551.]

[6] Cai Gang, Huang Yu, Yao Qingzhou, et al. Method of reser-

voir seismic inversion and its application in the Q 3D survey [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 972-976. [蔡刚, 黄玉, 姚清洲, 等. 储层地震反演方法及其在 Q 三维工区的应用 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 972-976.]

[7] Guo Chaobin, Yang Xiaobo, Chen Hongyue, et al. Constrained sparse pulse inversion research in reservoir prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(4): 397-400. [郭朝斌, 杨小波, 陈红岳, 等. 约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 397-400.]

[8] 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): 345-360. [潘昱洁, 李大卫, 杨楷. 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): 345-360.]

[9] Zhou Zhongli, Zhang Yanfang, Feng Zhaojian, et al. Application of seismic inversion technique in predicting reservoirs with organic reef/bank faces [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 34-36. [周仲礼, 张艳芳, 冯赵剑, 等. 地震反演技术在生物礁(滩)储层预测中的应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 34-36.]

[10] Gan Lideng, Dai Xiaofeng, Zhang Xin, Research into Post-Stack Seismic Inversions for Thin Reservoir Characterization: Deterministic and Stochastic[C]. Shenzhen: SPG/SEG International Geophysical Conference, 2011.

[11] 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. [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.]

[12] Yu Zhen, He Jing, Wei Fuji, et al. Joint application of sequen-

- tial indicator simulation and sequential gaussian simulation for detailed fluid prediction in a certain area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(6): 1170-1174. [余振, 何静, 魏福吉, 等. 序贯指示模拟和序贯高斯模拟在某地区精细流体预测中的联合应用[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(6): 1170-1174.]
- [13] Li Fangming, Ji Zhifeng, Zhao Guoliang, *et al.* Methodology and application stochastic seismic inversion; A case from P Oilfield, M Basin, Sudan[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 451-455. [李方明, 计智锋, 赵国良, 等. 地质统计反演之随机地震反演方法——以苏丹 M 盆地 P 油田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 451-455.]
- [14] 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. [慎国强, 孟宪军, 王玉梅, 等. 随机地震反演方法在埕北 35 井区的应用[J]. *石油地球物勘探*, 2004, 39(1): 75-81.]
- [15] Zhao Lin. Application of monte carlo simulation of markov chain in seismic inversion[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(2): 2640-2643. [赵林. 马尔可夫链蒙特卡罗模拟在储层反演中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 2640-2643.]
- [16] Hu Huafeng, Yin Xingyao, Wu Guocheng. Joint inversion of petrophysical parameters based on Bayesian classification[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(12): 225-228. [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(12): 225-228.]
- [17] Hua Zheyuan, Gan Lideng, Dai Xiaofeng, *et al.* Key parameter optimization and analysis of stochastic seismic inversion[J]. *Applied Geophysics*, 2012, 9(1): 49-56. [黄哲远, 甘利灯, 戴晓峰, 等. 随机地震反演关键参数优选和效果分析[J]. *应用地球物理*, 2012, 9(1): 49-56.]

Seismic Stepped Prediction Methods of Sub-salt Carbonate Reservoirs in Pre-Caspian Basin

YANG Qin-lin^{1,2}, ZHANG Jing², HAO Tao², ZHANG Ya-jun², LI Guo-Bin²

(1. *Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 210014, China*;

2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China*)

Abstract: In the sub-salt carboniferous of Pre-Caspian Basin widely develops platform carbonate reservoirs, which belong to fractured-porous type with strong heterogeneity. The reservoirs are featured by complex and various lithology, great lateral variable physical property, and thin layer. The favorable reservoir prediction becomes an exploration problem. The paper proposes stochastic seismic inversion and geostatistics association simulation methods to predict lithology and physical property gradually. Stochastic seismic inversion based on Markov chain Monte Carlo algorithm (MCMC) can obtain high-resolution impedance and lithology data. It firstly builds the prior probability of stochastic variable by the geostatistical analysis of well data, and then acquires the posterior probability with Bayes formula under the constraint of seismic data, finally resample the data according to the posterior probability by MCMC. Based on the previous predicted data, it builds the relationship between impedance and physical property parameter by cloud transform, and predicts the physical property parameter by geostatistical simulation. The inversion result has high vertical resolution and the identified minimum thickness of the reservoir layer is below 2 meters. The lateral variation truly reflects the characteristics of carbonate reservoir. The above methods can solve similar strong heterogeneous thin reservoir prediction problems.

Key words: Pre-Caspian Basin; Platform carbonate reservoirs; Stochastic seismic inversion; Markov chain Monte Carlo algorithm; Geostatistical simulation