

文章编号: 1001—1749(2011) 01—0001—05

碳酸盐岩礁滩油气储层地震预测方法探讨

贺振华^{1, 2}, 贾义蓉², 蒋炼², 黄德济²

(1 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059
2 成都理工大学 信息工程学院, 成都 610059)

摘 要: 储层结构和孔隙流体预测是目前碳酸盐岩礁滩油气储层地震预测的重点和难点。这里从流体敏感性参数的选择和基于储层结构模拟的孔隙度预测二方面, 研究了碳酸盐岩礁滩油气储层的流体识别问题。其中, 基于测井资料统计分析和 / 或岩石物理岩样测试的参数交会图的制作, 是优选烃类敏感参数的基础。在单一敏感参数的基础上, 构组复合型的流体识别因子, 能获得更好的流体识别效果。储层孔隙度预测是这样实现的: 首先, 对 Gassman 流体替换方程通过引入近似关系 $\beta_p - \beta_s \approx \beta_p$ 进行简化; 然后引入 Esheby-Walsh 储层结构参数以获得直接计算孔隙度的表达式; 最后, 根据弹性反演得到的纵波、横波阻抗 (或纵波、横波速度) 等参数, 计算得到孔隙度及孔隙流体预测剖面。经实际地震资料的流体预测结果显示, 新方法比常规方法预测的精度高。

关键词: 礁滩储层; 流体预测; 地震孔隙度反演; 孔隙结构
中图分类号: TE 122.2⁺ 21 **文献标识码:** A

0 概述

碳酸盐岩油气储层的预测, 主要包括缝洞型和礁滩型, 或二者的复合型储层的预测。在这里, 我们主要涉及的是生物礁滩型油气储层的识别和预测问题。

生物礁是碳酸盐岩隆的一种类型, 由各种抗浪耐冲击的, 具有极强生命力的造礁生物组成的特殊碳酸盐岩建造。礁、滩岩体相对围岩具有较高的孔隙度和渗透率, 是石油和天然气的良好储存场所, 具有油气丰度大、产能高的明显特征。世界上曾经达到日产万吨级油气的井总共只有九口井, 八口井在碳酸盐岩储层中, 而其中四口井在生物礁储层中。由此可见, 生物礁油气储层在油气勘探开发中占有十分重要的地位。

我国石油工业部门在四川盆地东北部、塔里木盆地和南海珠江口等盆地, 先后发现了不同类型和

特征的大型礁滩油气田, 有巨大的潜在资源量。因此, 加强生物礁、滩储层的勘探开发, 对缓解我国能源供求紧张的局面, 具有现实而又长远的战略意义。

然而, 生物礁滩储层属于隐蔽型岩性油气藏或者岩性~构造复合油气藏, 有相当大的预测难度。在以二维地震资料为主的勘查阶段, 预测生物礁滩储层的钻探成功率很低, 据刘划一等人^[1, 2]的资料显示, 在八十年代初投入了较多的礁滩勘探工作量以后, 至 1997 年底在已知的三十口礁井中, 属于正确预测的只有 10%。目前, 随着三维地震资料的广泛应用, 新的预测方法不断涌现, 以及勘探精度的逐步提高, 预测生物礁滩储层的钻探成功率已有大大提高^[3~5], 有的钻探成功率已达 90% 以上, 但这只是指钻遇生物礁体本身而言。而生物礁滩储层的内部结构和含流体性质的预测依然十分困难, 并且钻遇干井和水井的风险很大。主要原因在于:

(1) 储层结构和流体预测本身是国内、外的高难度研究课题, 探索性强。

(2) 碳酸盐岩礁滩储层内部岩性和孔隙流体结构的非均质性较其它储层更强, 与围岩的差异更小, 使得地震信号杂乱, 甚至空白。

(3) 目前储层识别和流体预测的一些有效方法和统计关系, 大多是针对碎屑岩储层的, 直接利用有一定困难。

(4) 碳酸盐岩储层往往埋藏深, 这一方面限制了多波和大出射角地震资料和相关先进方法的利用; 另一方面使地震资料的分辨率降低。

因此, 发展有针对性的预测方法是十分必要的。这里, 我们根据近年来在生物礁滩型油气储层识别和流体预测方面的实践, 探讨一些具体问题, 主要包括流体敏感性预测参数的选择和基于储层结构模拟的孔隙流体预测方法。

1 流体敏感性预测参数的选择

基于地震资料储层流体预测的一个重要前提是选择对流体比较敏感的物性参数和地震响应属性。所谓敏感参数系是指能将储层和非储层, 油气层和干层, 油气层和水层有效区分的参数。其主要方法有:

(1) 基于测井资料和 或岩石物理样品测试分析的流体敏感参数的选择。

(2) 应用物理和数学分析方法, 构造高灵敏度流体识别因子, 提高地震反演预测流体的可靠性。

1.1 基于测井资料或岩石物理样品测试分析的流体敏感参数选择

首先, 要根据任务要求, 并利用各种参数的交会图对有关参数逐一分析, 最后确定有利于流体识别的敏感参数或参数组合。由于生物礁滩储层的复杂性, 不同地区的储层, 其流体敏感参数可能很不相同; 即使在同一地区, 同一目的层, 各个井的敏感参数也会存在较大差异, 需要全面分析, 仔细选择。

图 1 为 ZJ 地区礁滩储层有效孔隙度和密度的测井参数交会图。由图 1 可见, 在相同孔隙度情况下, 利用密度可区分碳酸盐岩和碎屑岩层, 但很难识别油层和水层。

图 2(见下页)为 ZJ 地区礁滩储层中有效孔隙度与横波速度、纵横波阻抗差、纵横波阻抗平方差和自然伽玛的交会图。其中, 在相同孔隙度且孔隙

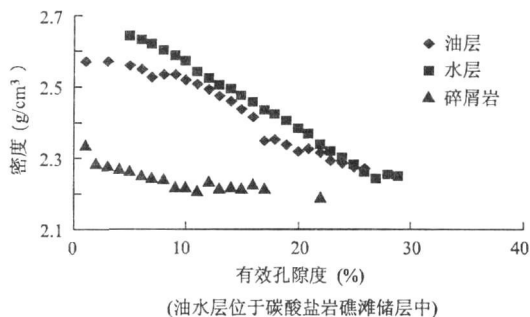


图 1 ZJ 地区礁滩储层有效孔隙度和密度的测井参数交会图

Fig 1 Crossplot of effective porosity and density for carbonate reef-shoal reservoir well-log data in ZJ area

度小于 20% 的情况下, 利用纵横波阻抗差和纵横波阻抗平方差有可能区分油~水层。而横波速度和自然伽玛不能可靠区分。

1.2 复合型流体识别因子的构造

通过基本的弹性参数 λ (拉梅系数)、 μ (剪切模量)、 ρ (密度) 和纵横波阻抗 I_p 、 I_s 可以构造更多、更敏感的复合型流体识别因子, 以获得更好的流体识别效果, 如公式 (1) ~ 公式 (5) 所示。

下页图 3~ 后面图 5 展示了部份流体识别因子对气~水层的潜在识别能力。

(1) 泊松比。

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \frac{I_p/I_s - 2}{2(I_p/I_s - 1)} \quad (1)$$

(2) Goodway(1997)等提出的识别因子。

$$\lambda\rho = I_p^2 - 2I_s^2 \quad (2)$$

(3) Russell(2003)等提出的流体属性。

$$\theta = I_p^2 - cI_s^2 \quad (3)$$

式中 f 为流体因子; c 为调节参数。

(4) 贺振华等提出的高灵敏度流体识别因子

$$u_{HFF} = \frac{I_p}{I_s} I_p^2 - B I_s^2 \quad (4)$$

式中 B 为调节参数。当 $B = 2I_p/I_s$ 时, 得

$$u_{HFF} = \frac{I_p}{I_s} (I_p^2 - 2I_s^2) \quad (5)$$

式 (5) 结合了 I_p/I_s 和 $I_p^2 - 2I_s^2$ 的优点。

2 基于储层孔隙结构模拟的孔隙流体预测方法探讨

我们将 Gassman 流体替换方程和由 Esheby 1957 年提出, 后经 Walsh 简化的方程^[6,7]相结合,

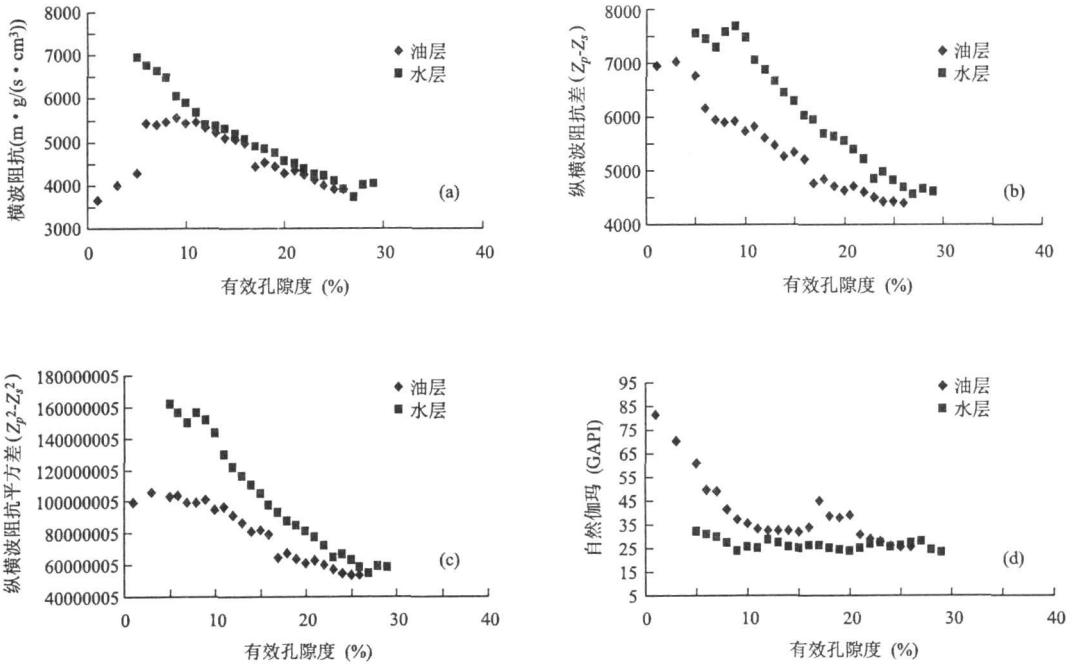
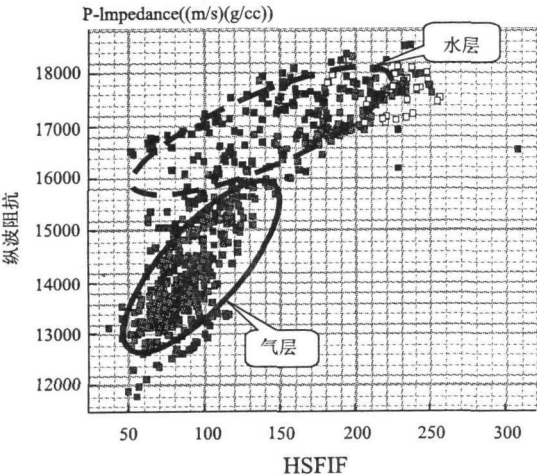


图 2 ZJ地区礁滩储层流体敏感参数的测井统计分析

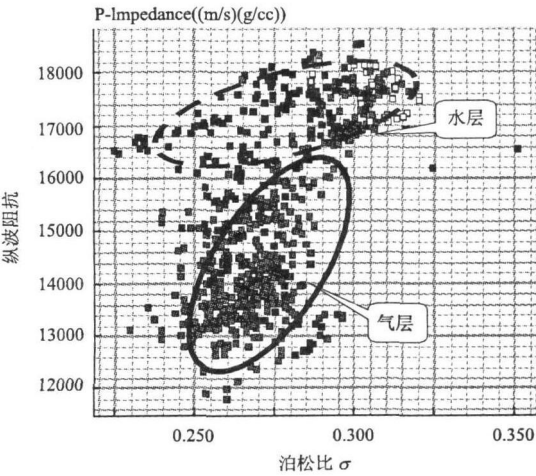
Fig 2 Crossplots of effective porosity and shear wave velocity (a) difference between P and S impedance (b) square difference of P and S impedance (c) Gamma curves from ZJ well-log data



(该图显示气~水层可以识别)

图 3 L地区礁滩储层高灵敏度流体识别因子(HSIF)与纵波阻抗的交会图

Fig 3 Crossplot of high sensitive fluid factor(HSIF) and P waves impedance from carbonate reef-shoal reservoir in L area



(该图显示气~水层可以识别)

图 4 L地区礁滩储层泊松比与纵波阻抗的交会图

Fig 4 Crossplot of high sensitive fluid factor and poisson's ratio from the area same as Fig 3

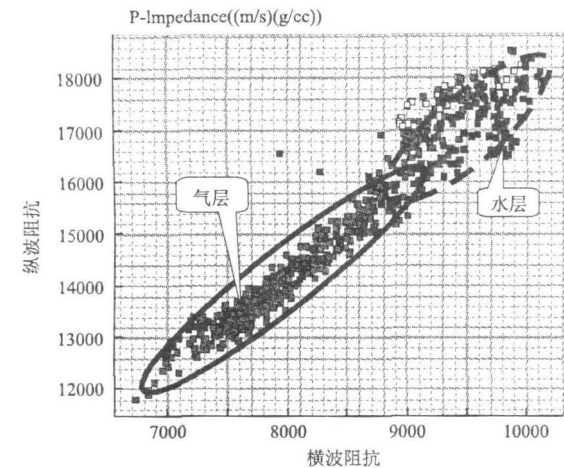
以便在考虑储层结构的同时，预测孔隙流体。因为孔隙结构和孔隙度，对储层的影响都很重要。

2 1 方法原理

Gassman流体替换方程^[8-12]如下：

$$\frac{1}{\beta - \beta_s} = \frac{1}{\beta_b - \beta_s} + \frac{1}{(\beta_b - \beta_s)\eta}$$
 (6)

式中 β_s 、 β_b 、 β_p 、 β 和 η 分别为含流体双相介质的基质(骨架)压缩系数、干燥(含空气)岩石的压缩系数、孔隙流体的压缩系数、含孔隙流体储层的有效压缩系数和储层的孔隙度。考虑到孔隙流体(油、气、水)的压缩系数，一般大于岩石基质(骨架)的压缩系数达一个数量级以上，可得 $\beta_p - \beta_s \approx \beta_p$ 的近似关系(对碳酸盐岩来说，其基质压缩系数



(该图显示气~水层参数值重叠较多,气~水识别效果可能不理想)

图 5 L地区礁滩储层纵波、横波阻抗的交会图

Fig 5 Crossplot of P-wave and S-wave impedances in L area

比碎屑岩的小一倍以上,可使该项近似的可行性更好!)。于是,式 (6)可简化为:

$$\frac{1}{\beta - \beta_s} = \frac{1}{\beta_b - \beta_s} + \frac{1}{\beta_p \eta} \tag{7}$$

由式 (7),得

$$\eta = \frac{(\beta - \beta_s)(\beta_b - \beta_s)}{\beta_p(\beta_b - \beta)} \tag{8}$$

由 Eshelby 和 Walsh 的干燥岩石椭球包体近似公式^[5,6]:

$$\beta_b = \beta_s (1 + m \frac{\eta}{\alpha}) \tag{9}$$

式中 m 为干燥岩石椭球包体的结构参数之一; α 是另一结构参数,表示椭球孔隙或裂隙的纵横 (或长短轴)比; β_b 在式 (8)和式 (9)中具有相同的涵义。将式 (9)代入式 (8),经简化后得式 (10)。

$$\begin{aligned} \eta &= (\bar{\beta} - \beta_s) (\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s}) = \\ &\bar{\beta} (\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s}) - \beta_s (\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s}) = \\ &A \beta - B \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $C = \frac{\alpha}{m}$ 为模型的结构参数; $A = (\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s})$; $B = \beta_s (\frac{1}{\beta_p} + \frac{C}{\beta_s})$ 。

由 A、B 的表达式,很易得到:

$$\beta_s = B / A \tag{11}$$

β 和 η 为饱和流体的压缩系数和孔隙度,可由岩石物理测试分析或测井参数统计获得。 β_p 的参考值可用公式计算^[16,17], β_s 为岩石基质压缩系数,一般较难得到。但通过式 (10)的统计分析和线形拟合,可求出 A、B,再按式 (11),很易求得 β_s 。上述关系式对地震弹性正演、反演和流体识别,有着重要参考价值。

2 2 应用效果

通过地震叠前弹性参数反演,首先获得纵横波阻抗或纵横波速度,然后利用上述公式获得考虑了孔隙结构的孔隙度和孔隙流体反演剖面。图 6 为某区通过 Ky1 井的孔隙度地震反演剖面。图 6(b)

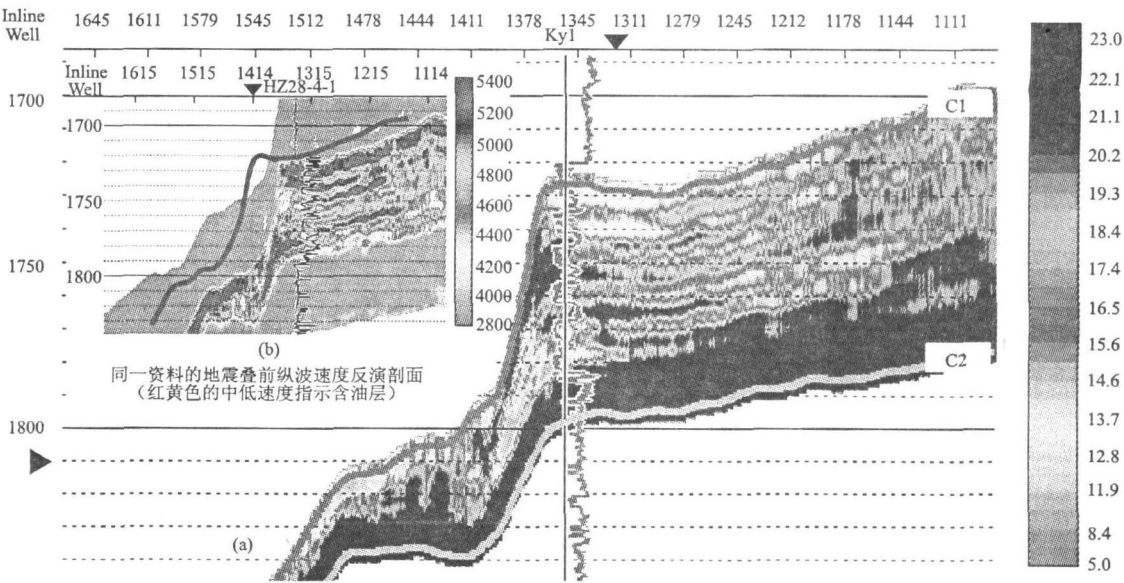


图 6 基于礁滩储层内部孔隙结构模拟的孔隙度预测剖面 (红黄色的中低孔隙度指示含油层)

Fig 6 Comparison between new porosity inversion (a) and traditional P wave velocity inversion (b). The result of porosity inversion is better than the one in (b)

为同一资料的常规叠前纵波速度反演剖面。剖面中的红黄色标代表中低孔隙度和中低纵波速度,是油层存在的标志。二者相比,孔隙度反演的结果与 K_{y1} 井资料的吻合度比纵波速度反演结果的吻合程度更好。

3 结论

(1)流体敏感性预测参数的选择,对碳酸盐岩礁滩油气储层以及其它类型储层的流体预测都是十分重要的。其中,根据测井参数和岩石物理测试参数所做的交会图,是进行流体敏感参数选择的基础性图件。在制作不同参数的交会图件时应当尽可能全面,以便挑选出真正的敏感性参数或参数组合。

(2)复合型流体识别因子较单一的敏感参数有更好的流体识别效果,而且构组方法简单。读者可根据研究任务的需要,自行构组更多、更有效的复合型流体识别因子。

(3)基于储层内部孔隙结构模拟的孔隙度预测(反演)方法的优点是考虑了孔隙结构这一重要因素,有利于储层基质压缩系数的估算,并见到了一定的实际应用效果。但仍然存在孔隙结构参数估算的困难,而且基质压缩系数的估算值要随孔隙流体的性质变化,这些问题还需要进一步认识和探索。

参考文献:

- [1] 刘划一, 王一刚, 杨雨, 等. 川东上二叠统生物礁气藏多元信息综合预测方法研究[J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 13
- [2] 陈太源. 九龙山构造南侧存在长兴组台缘礁的探讨[J]. 天然气工业, 1989, 9(1): 6
- [3] 贺振华, 蒲勇, 熊晓军, 等. 川东北长兴~飞仙关组礁滩储层的三维地震识别[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(1): 1.
- [4] 贺振华, 黄德济, 文晓涛. 裂缝油气藏地球物理预测[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007.
- [5] 牟书令. 中国海相油气勘探理论技术与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [6] 陈颢, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
- [7] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [8] SHERIFF R E. Reservoir Geophysics[M]. SEG, 1992
- [9] AMOS NUR. 双相介质中波的传播[M]. 许云, 译. 北京: 石油工业出版社, 1986
- [10] PER AVSETH, TAPAN MUKERJI GARY MAVKO. Quantitative Seismic Interpretation—Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk[M]. Cambridge University Press, 2005.
- [11] LEON THOMSEN. Understanding seismic anisotropy in exploration and exploitation[M]. SEG, 2002
- [12] MAVKO G, MUKERJIT, DVORKIN J. The rock physics handbook—tools for seismic in porous media[M]. Cambridge University Press, 2003.
- [13] RUSSELL B H. The application of multivariate statistics and neural networks to the prediction of reservoir parameters using seismic attributes Calgary[M]. Department of Geology and Geophysics, Canada, 2004
- [14] CONNOLLY. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4): 438
- [15] 王之敬 (Wang Zee). “岩石物理概述”学术报告(PPT)[D]. 2002
- [16] 邹文. 基于地震资料的流体识别技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008
- [17] 刘雯林. 油气田开发地震技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996

作者简介: 贺振华 (1938—), 男, 湖北大悟县人, 教授, 博士生导师, 现主要从事油气地球物理和岩石物理等领域的教学与研究工作。

ABSTRACTS

RESEARCH ON THE METHODOLOGY OF CARBONATE REEF-SHOAL RESERVOIR DESCRIPTION BY 3D SEISMIC DATA

HE Zhen-hua^{1,2}, JIA Yi-rong², JIANG Lian², et al
(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(1): 1

Predictions of reservoir pore-composition and pore-fluid on carbonate reef-shoal formation by using seismic data are very important and difficult. The problems of reservoir pore-composition and pore-fluid predictions can be solved partially by both optimal selection of hydrocarbon-sensitive parameters and an improved seismic porosity inversion. The hydrocarbon-sensitive parameter selection can be implemented through crossplot of elastic parameters and fluid factors which are constructed by compositing several reservoir parameters from well log data and/or petrophysics data. The calculations of improved seismic porosity inversion are divided in three steps: (1) simplification of Gassman-equation by $\beta_p - \beta_s \approx \beta_p$; (2) substituting Eshelby-Walsh pore-composition parameters into Gassman-equation; (3) implementing seismic porosity inversion using new equations above. Field data examples show that the improved porosity inversion is better than traditional ones.

Key words reef-shoal reservoir; fluid prediction; seismic porosity inversion; pore composition

THE NEW TREND AND APPLICATION EFFECT OF FIRST ARRIVAL INVERSION STATIC CORRECTION

JIANG Zai-dao, ZHANG Xu-jian, JIANG Lin, et al (GRI Exploration and Production Research Academy, Xinjiang Oilfield Company, Urumqi Xinjiang 830013, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(1): 6

In complex weathering areas, single static correction method is becoming harder to have good image and right structure, although those technologies ever played important roles. Accurate near-surface model based on integrated solution for visualization model and near-surface information interpretation is the new trend of static correction technology. It succeeds in

Quanl area. The new techniques include different technologies applied to different layers and cases, integrated solution for visualization model and near-surface information applied as much as possible, and step by step iteration and mutual restriction. This method can not only improve seismic imaging accuracy and structure features, but also avoid excessive increase of drilling holes.

Key words integrated solution; mutual restriction; step by step iteration; comprehensive near-surface modeling

A PRESTACK INVERSION METHOD FOR COMMON REFLECTION POINT SEISMIC DATA

ZHANG Fan-chang¹, YIN Hai-yan², WENG Bin², et al (1. College of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China; 2. The Research Center of CNOOC, Beijing 100027, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(1): 11

Prestack seismic data contains the P-wave, S-wave velocity and density information of subsurface stratigraphy. If these parameters can be acquired from seismic data by prestack inversion, plenty of lithology and pore fluid information can be revealed. This paper derived the forward operator, which is generated by the plane wave propagation in stratified elastic media. A prestack three-term inversion method which is based on Brent algorithm is then proposed. This method did not need to compute the sophisticated first order and second order derivative matrix. By dealing the constraint conditions with adaptive annealing factor and penalty function, the inversion stability is improved. By introducing K-L transform in the direction substitution, the linear dependence of searching directions is effectively prevented. Application results in synthetic and real oil field data proved that this method is effective in reservoir prediction with prestack seismic data.

Key words prestack inversion; seismic gather; Brent algorithm; forward operator; K-L transformation

NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS BASED ON CARBONATE ROCK RESERVOIR MODEL

ZHOU Hua-lai, LI Lu-ming, LUO Sheng-xian, et al (State Key Lab. of Oil Reservoir Geology and De-