

文章编号: 0253-9985(2007)03-0395-06

地层孔隙压力预测新方法

魏茂安¹, 陈 潮², 王延江², 马 海²

(1 中国石化 胜利油田有限公司 钻井工艺研究院信息中心, 山东 东营 257017;

2 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 在分析地层孔隙压力预测传统方法局限性的基础上, 提出了一种基于有效应力定理和声波速度模型的地层孔隙压力预测方法。由相关测井资料计算泥质含量、孔隙度和声波速度, 通过支撑向量回归机计算垂直有效应力, 密度测井资料计算上覆岩层压力, 最后根据有效应力定理计算地层孔隙压力。实例分析表明, 该方法用于预测砂泥岩及欠压实成因的异常地层压力是可行的。与传统方法相比, 该方法不需要建立正常压实趋势线, 有较好的适应性和预测精度。

关键词: 地层孔隙压力; 支撑向量回归机; 声波速度; 孔隙度; 泥质含量; 垂直有效应力

中图分类号: TE112.23 **文献标识码:** A

New approach for pore pressure prediction

Wei Ma'an¹, Chen Chao², Wang Yanjiang², Ma Hai²

(1 Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration Bureau, SINOPEC, Dongying, Shandong 257017;

2 School of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061)

Abstract By analyzing the limitations of the traditional pore pressure prediction methods, a new pore pressure prediction approach based on the effective stress theorem and the acoustic velocity model is proposed. It first calculates clay content, porosity, and acoustic velocity with relevant log data, and then calculates vertical effective stress by using Support Vector Machines for Regression and the overburden pressure with density log data, and finally calculate formation pore pressure by the effective pressure theorem. Practical application of the approach shows that it is feasible in prediction of abnormal formation pressure of sandstone and shale caused by undercompaction. Compared with traditional pore pressure prediction methods, the approach does not require establishing normal compaction trend line and has better adaptability and higher accuracy of predictions.

Key words pore pressure; support vector machine for regression; sonic velocity; porosity; shale content; vertical effective stress

异常地层孔隙压力的存在, 不仅给石油勘探、钻井和开发带来很多困难, 而且对安全钻井构成潜在的威胁。因此, 在石油勘探中, 地层孔隙压力的预测显得十分重要, 其为设计钻井参数、井身结构提供重要的压力技术数据, 对保护油气层、提高钻井成功率具有重要意义。

测井资料, 尤其是地层声波速度, 与地层孔隙压力密切相关, 是确定地层孔隙压力较为理想的资料。利用测井资料预测地层孔隙压力的传统方

法有声波时差法、电导率法、密度法和中子测井法等^[1, 2]。这些方法通常首先建立正常趋势线, 并根据测井曲线是否偏离正常趋势线来定性判断是否存在异常地层孔隙压力, 若测井曲线明显偏离了正常趋势线, 则认为存在异常高压或低压, 然后再通过经验系数法、等效深度法和 Eaton 法^[3]等定量计算地层孔隙压力。

传统预测方法提高了钻井的安全性和可靠性。但随着钻探深度与难度的提高, 地层结构越来越复

收稿日期: 2006-09-06

第一作者简介: 魏茂安 (1966—), 男, 高级工程师、博士, 信号与信息处理、测控技术

基金项目: 中国石化重大科技项目 (JP04014)

杂,传统预测方法的局限性逐渐暴露出来,主要有以下几个方面:1)需要建立正常趋势线,且假定其为直线。正常趋势线的确定具有较大的随意性,缺乏严格的科学依据,且认为正常趋势线是直线的结论,严格来说并不正确。2)不适用于检测泥岩以外其他岩性的地层孔隙压力,因这些方法通常是以泥质岩测井资料参数与深度的变化关系分析为基础;3)不适用于预测不平衡压实以外其他异常高压形成机制产生的泥岩异常地层压力;4)定量计算地层孔隙压力的方法,缺乏可靠的理论依据。

本文在分析传统方法局限性的基础上,提出了一种基于支撑向量回归机的测井资料预测地层孔隙压力方法,并对同一地区几口井进行预测,取得了较好的效果。

1 支撑向量回归机

用于非线性回归估计的支撑向量回归机(The Support Vector Machines for Regression, SVR)是一种得到广泛应用的最优化技术^[4],它从 Vapnik^[5]统计学习理论发展而来,是一种特别适用于小样本学习的算法,其基本思想是通过内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维空间,然后在这个高维空间中寻找输入变量和输出变量之间的一种线性关系(图 1)。核函数能够方便和有效地实现数据从输入空间到对应的非线性高维空间的转换。支撑向量回归机通过选择一些

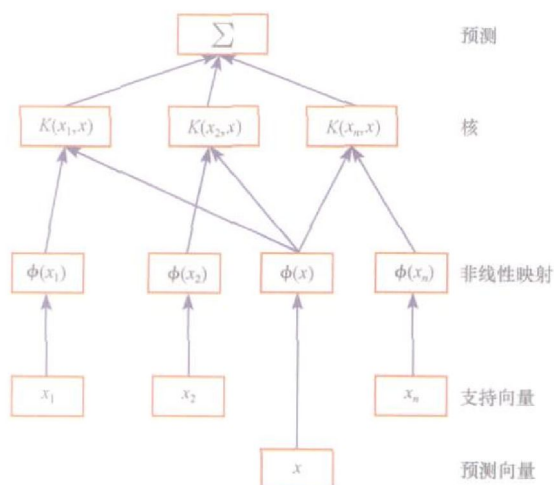


图 1 支撑向量机结构示意图

Fig. 1 Sketch map showing the structure of the support vector machines for regression

训练点最终能够产生一个稀疏估计函数,而这些训练点即为支撑向量,能够根据输入数据来估计输出。虽然在这点上支撑向量回归机和神经网络相类似,但神经网络的方法是基于经验风险最小原则。相比较而言,支撑向量回归机通过在经验误差(风险)与模型复杂性之间的折中,近似地实现了 Vapnik 的结构风险最小原则,因此,支撑向量回归机实现全局最优化,而神经网络只是实现了一个局部最优化^[6-7]。

在支撑向量机回归分析模型中,训练数据集形式为 $\{X_i, y_i\}_{i=1}^l$, $X_i \in \mathbb{R}^p$ 为输入数据, y_i 为目标输出, l 为训练数据点数。支撑向量回归算法用来实现输入数据与输出数据之间的非线性拟合,非线性拟合函数的形式如下:

$$f(X) = \langle W, \phi(X) \rangle + b \quad (1)$$

式中: $\phi(X)$ 是一个非线性映射,生成一个和输入向量 X 同维的向量; $f(X)$ 和 $\phi(X)$ 为函数; W 为模型参数; b 为偏移量。

支撑向量机回归最优化问题就是寻找一个函数,在规定误差内能够估计出几乎接近于目标的输出,同时最小化 W 模型参数使其更具有推广性。优化目标等价于一个最基本的凸二次规划问题,其形式如下:

$$\min_{W, b} \frac{1}{2} \|W\|^2 \quad (2)$$

约束条件:

$$\begin{cases} y_i - \langle W, \phi(X_i) \rangle - b \leq \varepsilon \\ \langle W, \phi(X_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, l)$$

式中: ε 为规定误差; y 为目标。

考虑允许有拟合误差的情况,引入松弛因子 ξ, ξ 则带有松弛因子 ξ 和 ξ 的同等最优化问题可表示为:

$$\min_{W, b, \xi, \xi} \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi + \xi) \quad (3)$$

约束条件:

$$\begin{cases} y_i - \langle W, \phi(X_i) \rangle - b \leq \varepsilon + \xi \\ \langle W, \phi(X_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi \\ \xi, \xi \geq 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, l)$$

式中: ξ 和 ξ 为松弛因子; C 为惩罚系数,用来惩罚超出误差 ε 的数据点,并作为误差 ε 与优化目标 $\frac{1}{2} \|W\|^2$ 之间的权重。采用拉格朗日乘数法,这样就得到一个等价的二次规划问题,形式如下:

$$\min_{\alpha, \alpha^*} -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \langle \phi(X_i), \phi(X_j) \rangle - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \quad (4)$$

$$\text{结束条件: } \begin{cases} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, l)$$

式中: $\alpha_i, \alpha_i^* \geq 0, i, j = 1, 2, \dots, l$ 为拉格朗日乘子。

求解上述二次规划优化问题得到目标向量:

$$W^* = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(X_i) \quad (5)$$

式中: W^* 为目标向量。

偏移量 b 由标准支撑向量计算得到, 因此估计函数变换成如下形式:

$$f(X) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \langle \phi(X_i), \phi(X_j) \rangle + b \quad (6)$$

我们引入式 (7) 所示的核函数代替式 (6) 中的内积。

$$\langle \phi(X_i), \phi(X_j) \rangle \rightarrow K(X_i, X_j) \quad (7)$$

式中: $K(X_i, X_j)$ 是一个必须满足 Mercer 条件的函数。核函数有很多形式, 在本文采用能够很好地解决复杂非线性问题的径向基 (RBF) 核函数:

$$K(X_i, X_j) = \exp \left[-\frac{\|X_i - X_j\|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8)$$

最后, 在本文中用到估计函数的最终形式如下:

$$f(X) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \exp \left[-\frac{\|X - X_i\|^2}{2\sigma^2} \right] + b \quad (9)$$

2 预测原理

本文提出的方法的理论基础是有效应力定理和声波速度模型, 利用支撑向量回归机在解决小样本非线性回归问题上的优势, 分析测井资料与地层上覆岩层压力、垂直有效应力的相关性, 通过相关测井资料来预测地层压力。主要过程如下: 先由声波时差、自然伽马测井曲线计算得到声波速度、孔隙度和泥质含量, 输入到基于 SVR 的声波速度模型得到垂直有效应力, 然后由密度测井曲线计算得到上覆岩层压力, 最后根据有效应力定理计算得到地层孔隙压力。图 2 为其预测流程图, 下面分别介绍其主要部分的作用和具体实现。

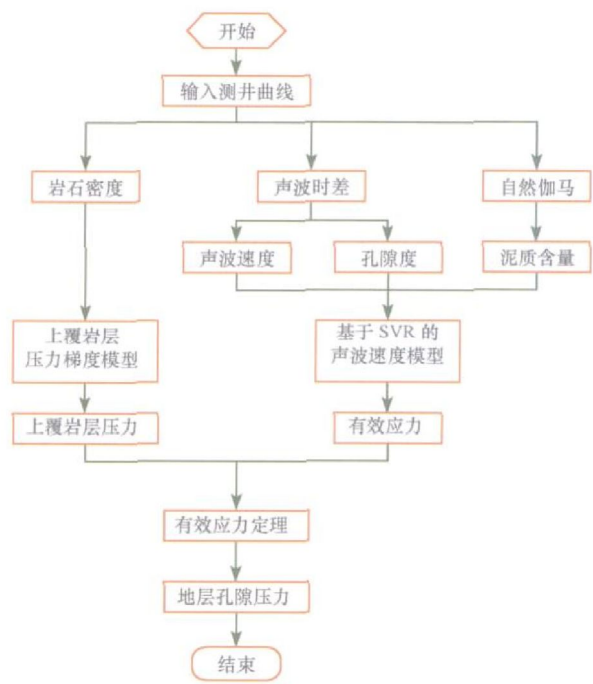


图 2 地层孔隙压力预测流程图

Fig. 2 Flow chart for predicting pore pressure

2.1 有效应力定理

Terzaghi (1923 年) 在研究饱和和多孔介质的力学性质是提出了有效应力定理:

$$p_e = p_o - p_p \quad (10)$$

式中: p_o 为上覆岩层压力, MPa; p_e 为垂直有效应力, MPa; p_p 为地层孔隙压力, MPa。上覆岩层压力可以通过密度测井资料等方法求得, 因此关键在于如何求得垂直有效应力。

2.2 上覆岩层压力计算^[8]

某深度处的上覆岩层压力是指该深度以上地层岩石骨架和孔隙流体总重力产生的压力,

上覆岩层压力梯度是上覆岩层压力的单位深度增加值。

密度测井曲线可以比较真实地反映地下岩石的体密度随其埋藏深度的变化规律, 是求取上覆岩层压力最为理想的资料。因而上覆岩层压力梯度主要取决于上覆岩石的体密度, 上覆岩层压力梯度和上覆岩层压力计算公式如下:

$$G_o = \left| \rho_w h_w + \rho_0 h_0 + \sum_{i=1}^l \rho_{bi} \Delta h_i \right| / \left| h_w + h_0 + \sum_{i=1}^l \Delta h_i \right| \quad (11)$$

$$P_o = 10^{-3} \cdot G_o \cdot g \cdot H \quad (12)$$

式中: G_o 为上覆岩层压力梯度, kg/L ; ρ_w 和 h_w 分别为海水密度及水深, kg/L 和 m ; ρ_0 和 h_0 分别为上部无密度测井地层段平均密度及厚度, kg/L 和 m ; ρ_b 为一定深度的密度数据, kg/L ; Δh 为深度间隔, m ; g 为重力加速度, 9.81g/s^2 ; H 为目的层深度, m 。

2.3 基于支撑向量回归机的有效应力计算

Eberhart-Phillips^[9-12]等详细分析了前人的大量与声波速度相关的测试数据,认为影响砂泥岩中声波速度的因素主要有:孔隙度、泥质含量和垂直有效应力,并给出了一个纵波速度模型,樊洪海^[8]等人经过研究认为,这个模型用于预测地层孔隙压力也是可行的。

类似于神经网络,用支撑向量回归机进行参数的非线性回归估计,首先要选择训练样本,确定系统的输入特征向量和输出,选择系统结构参数,然后便可对支撑向量回归机进行训练,训练完成后便可使用其进行参数的非线性回归估计。

分析声波速度模型,本文认为垂直有效应力与孔隙度、泥质含量、声波时差密切相关,因此选取孔隙度、泥质含量和声波时差 3 个参数作为支撑向量回归机的输入特征向量,垂直有效应力作

为输出。

孔隙度可以由已钻井的声波时差、岩石密度等测井资料计算得到,泥质含量可以由已钻井的自然伽马、自然电位等测井资料得到。

垂直有效应力的计算过程如下:首先由已钻井的测压资料得到地层静水压力或地层孔隙压力,然后根据上覆岩层压力梯度模型由密度测井资料计算到上覆岩层压力,最后根据有效应力定理计算垂直有效应力。

由于 3 个输入参数的刻度差异较大,在用支撑向量回归机进行训练时,有必要对输入参数分别归一化到 $[0, 1]$ 范围内,以消除刻度的影响。归一化公式为:

$$x_{\text{归}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (13)$$

式中: x 为某个输入参数对应的值, x_{min} 和 x_{max} 分别为该输入参数的最大和最小值, $x_{\text{归}}$ 为该输入参数的归一化值。

用支撑向量回归机进行垂直有效应力估计时首先要选取一口或几口具有代表性的已钻井,并用这些井的测井、测压资料作为样本数据,从中提取上述 3 个输入特征向量并计算出对应的目标输出,组成训练样本数据,然后用前面提出的方法构造支撑向量回归机。在训练支撑向量回归机的过

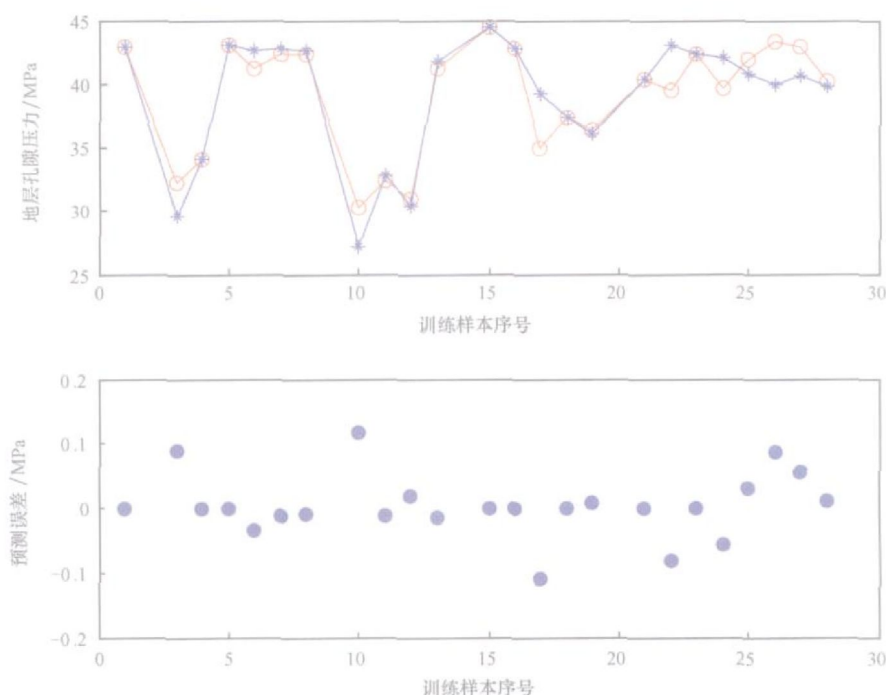


图 3 训练样本地层压力测试结果

Fig. 3 Test result of formation pressure in training samples

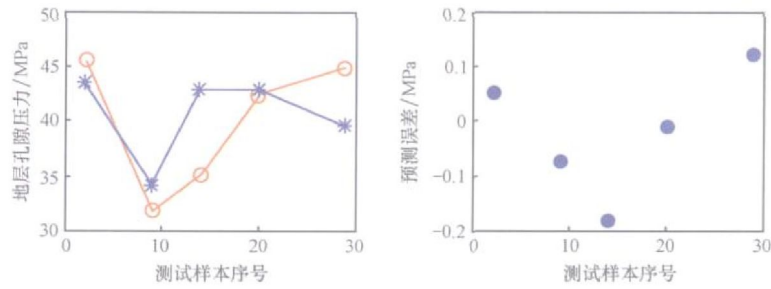


图 4 测试样本地层压力测试结果

Fig. 4 Test result of formation pressure in testing samples

程中,通过选取不同的核函数、惩罚系数和控制误差,使支撑向量回归机达到最优。支撑向量回归机训练完成以后,它的基本结构也就定了下来,即可用于其他井的压力预测。

3 应用实例

为了训练支撑向量回归机,选取准噶尔盆地腹部某区块几口井的测井和测压资料,按照上述方法对数据进行处理,归一化后得到 29 个样本,其中 24 个作为训练样本,其余 5 个作为测试样本,SVR 训练时的参数选择如下:核函数选径向基核函数;惩罚系数为 1 000,控制误差为 0.01。训练好支撑向量回归机后,分别对训练样本和测试样本进行测试(图 3),上图为地层孔隙压力图,其中蓝色星号为压力实际值,红色圆圈为压力预测值,下图为预测误差图;测试样本测试结果如图 4 所示,左图为地层孔隙压力图,其中蓝色星号为压力实际值,红色圆圈为压力预测值,右图为预测误差图,从测试结果可以看出,预测平均误差在 10% 以内。

采用本文方法,将训练好的支撑向量回归机对准噶尔盆地腹部某区块上的庄 103 井和庄 106 井进行压力预测(图 5 图 6),左图为垂直有效应力剖面图,右图为地层孔隙压力剖面图,实线为预测压力值,圆圈为实际压力值,从图中可以看出,预测结果相当理想。

4 结论

本文提出的方法是在 Eberhart-Phillips 的声波纵波速度经验模型的基础上发展而来的,借助声波速度主要受 3 个因素(泥质含量、孔隙度、垂直

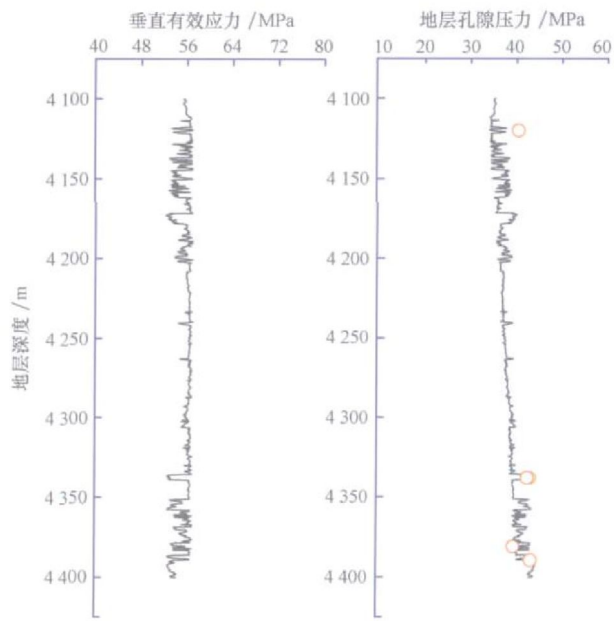


图 5 庄 103 井地层压力预测结果

Fig. 5 Prediction of formation pressure in Well Zhuang-103

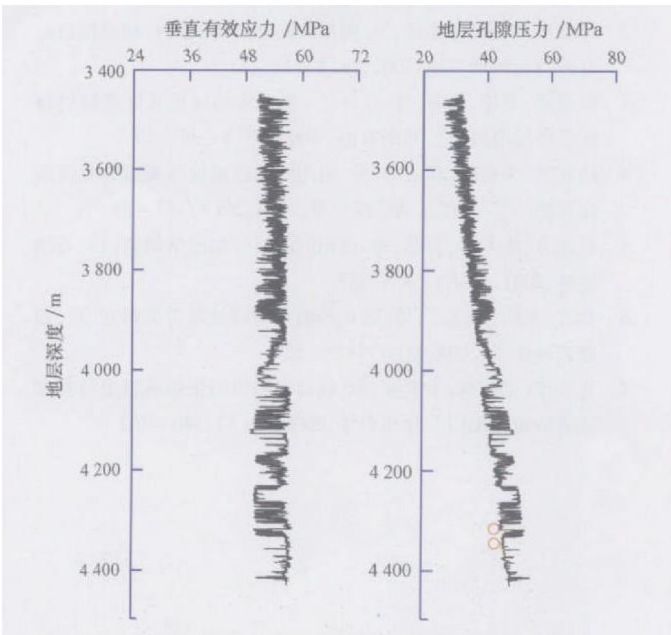


图 6 庄 106 井地层压力预测结果

Fig. 6 Prediction of formation pressure in Well Zhuang-106

有效应力)影响的理论依据,利用支撑向量回归机建立声波速度模型,根据测井资料计算声波速度、泥质含量和孔隙度,声波速度模型计算垂直有效应力,密度测井资料计算上覆岩层压力,最后由有效应力定理计算得到地层孔隙压力。与传统方法相比,该方法不需要建立正常趋势线,适用于预测砂泥岩及非欠压实成因的异常地层压力,使用范围广,且精度高。如果对计算泥质含量、孔隙度和上覆岩层压力梯度模型进行改进,预测结果准确性可进一步提高。

参 考 文 献

- 1 钻井手册编写组. 钻井手册(甲方)[M]. 北京:石油工业出版社, 1990 47~ 56
- 2 赵桂萍. 准噶尔盆地南缘异常高压及其与油气成藏的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 327~ 328
- 3 Eaton B A. The equation for geopressure prediction from well logs [A]. SPE 5544 1975
- 4 史清江, 王延江. 用于非线性回归估计的支撑向量机[M]. 山东济南: 山东大学出版社, 2004 236~ 240
- 5 Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag 1999
- 6 Cristianini N, Taylor J S. An introduction to support vector machines and other kernel-based Learning methods[M]. London: Cambridge University Press 2000
- 7 邓乃杨, 田英杰. 数据挖掘中的新方法——支撑向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004 45~ 67
- 8 樊洪海. 地层孔隙压力预测检测新方法研究[D]. 北京: 石油大学, 2001 34~ 53
- 9 Eberhart P D, Han D H, Zoback M D. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone[J]. Geophysics 1989, 54(1): 82~ 88
- 10 刘树根, 单钰铭, 黄思静, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层声学参数特征及变化规律[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 399~ 404
- 11 魏春光, 雷茂盛, 万天丰, 等. 古龙-徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 78~ 84 105
- 12 李生杰. 岩性、孔隙及其流体变化对岩石弹性性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 760~ 764

(编辑 高 岩)

(上接第 389 页)

参 考 文 献

- 1 陈文学, 朱水安, 秦秉操, 等. 南阳凹陷张店油田二次勘探及认识[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 64~ 66
- 2 林学庆, 罗家群, 陈萍, 等. 南阳凹陷北部斜坡带有利勘探目标分析[J]. 河南石油, 2002, 16(6): 11~ 13
- 3 程学峰, 李琛, 咎新, 等. 北马庄-黑龙庙地区低孔低渗储层特征及勘探潜力[J]. 河南石油, 2003, 17(1): 17~ 19
- 4 陆建林, 李思田, 邱荣华, 等. 南阳凹陷隐蔽油气藏的分类及勘探思路[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(1): 27~ 28
- 5 付志方, 张本书, 咎新, 等. 南阳凹陷层序地层学研究[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 283~ 287
- 6 程吉, 朱伟, 谭承军, 等. 陆相断陷盆地缓坡弯折带研究[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(6): 527~ 529
- 7 肖丽华, 孟元林, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷沙河街组成岩史分析和成岩阶段预测[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 346~ 362
- 8 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84~ 88
- 9 钟大康, 朱筱敏, 蔡进功. 沾化凹陷下第三系砂岩次生孔隙纵向分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 286~ 289
- 10 赵追, 赵全民, 孙冲, 等. 陆相断陷湖盆的成岩圈闭——以泌阳凹陷下第三系核桃园组三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 154~ 157
- 11 弗里德曼 G M, 桑德斯 J E. 沉积学原理[M]. 陆伟文, 译. 北京: 科学出版社, 1987. 140~ 144
- 12 Mazzullo S J, Harris P M. Mesogenetic dissolution and its role in porosity development in carbonate reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(5): 607~ 620
- 13 Geokstein R H. Fluid inclusion in sedimentary and diagenetic systems[J]. Lithos 2001, 55 159~ 193

(编辑 李 军)

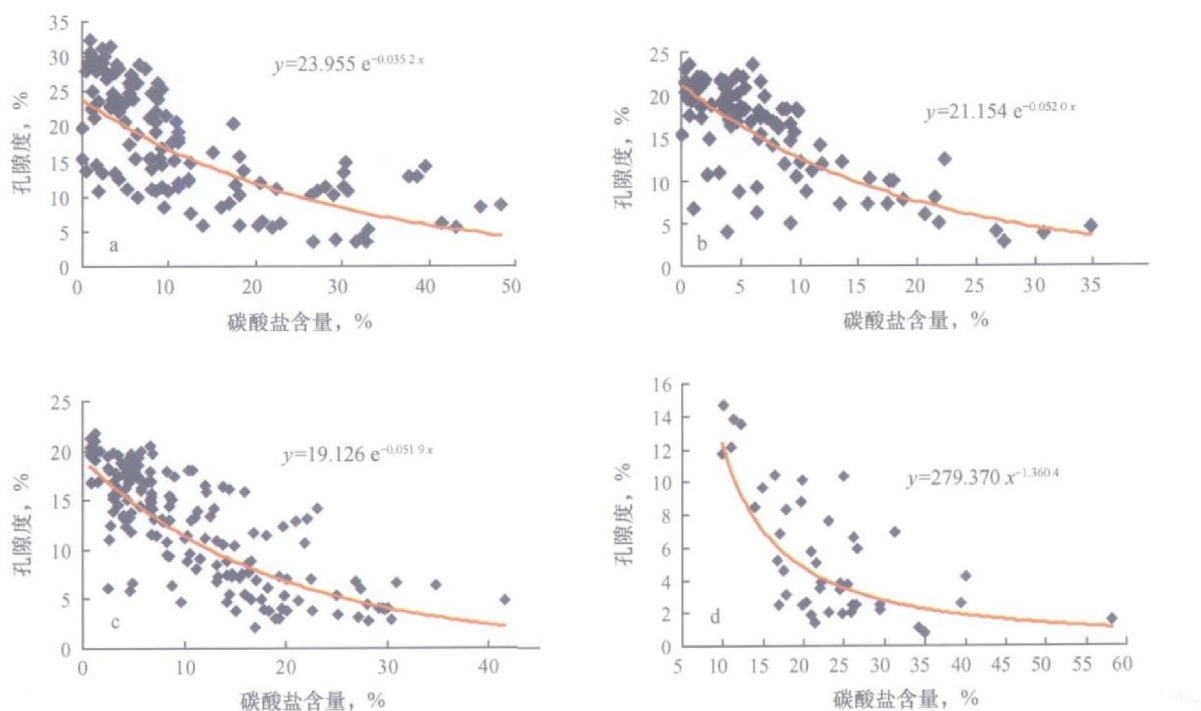


图 5 南阳凹陷核桃园组不同成岩阶段储层碳酸盐含量与孔隙度的关系

Fig. 5 Relationship between the content of carbonate cements and the porosity of reservoirs during different diagenetic stages of the Hetaoyuan Formation, Nanyang sag

- a. 1 400~1 850 m (早成岩阶段); b. 1 850~2 150 m (晚成岩 A₁ 亚期);
c. 2 150~2 450 m (晚成岩 A₂ 亚期); d. 2 450~3 300 m (晚成岩 B 期)

通过以上分析可以看出, 寻找优质储层必须考虑到碳酸盐胶结的影响。从埋藏深度上看, 优质储层发育于晚成岩 A₁ 和 A₂ 亚期及以前, 即 0~2 450 m 深度。在晚成岩 A₁ 亚期, 由于受排烃产生的酸性水影响, 最有利于次生孔隙发育, 特别是被烃源岩包围并直接接触的储层; 然而继续埋深后, 这种有利将逐渐变得不利, 尤其是水进期或高水位期三角洲前缘薄层砂一般胶结严重。在埋藏深度相同或相当的情况下, 从碳酸盐胶结物与砂体发育程度及其在不同微相砂体中的分布规律看, 砂地比较高的区域或层段更为有利。如三角洲前缘水道砂、河口坝砂和低水位期推进到深凹中的砂体 (包括来自北部斜坡与南部陡岸带的), 它们即使埋深很大, 除砂、泥岩界面附近外, 其他部分常常也会有较好的物性。此外, 封闭的成岩环境有利于碳酸盐胶结^[12, 13]。在深凹带内的断层发育区, 断层在活动期可沟通地表水形成开放的水动力环境, 不利于碳酸盐胶结物的形成。所以, 寻找优质储层时还应考虑断层的发育及其活动性。

6 结论

1) 储层中碳酸盐胶结物的含量随深度增大而增加, 但有机质成熟和排烃对碳酸盐胶结有明显的抑制作用。碳酸盐溶解期是次生孔隙的主要发育期。

2) 随成岩演化和埋藏深度增大, 碳酸盐具有从泥岩向砂岩尤其是高孔隙优质砂岩富集的规律。晚成岩 B 期 (2 450 m) 以后, 富集速度加大。

3) 碳酸盐在储层中的不断富集是造成本区储层孔隙度下降的主要因素之一。孔隙度大幅下降期和碳酸盐的主迁移期时间一致。

4) 碳酸盐胶结物最易于富集在三角洲前缘分支水道砂的底部和河口坝砂的顶部。

5) 在本区寻找优质储层主要有两个方向, 即 2 450 m 深度以上层位和砂地岩比大的地区或层段的厚层砂体。

(下转第 400 页)