

基于地震资料的探井钻前孔隙压力预测 ——以伊拉克A油田为例

陈鑫¹, 魏小东¹, 李艳静¹, 夏亚良¹, 周晓明¹, 王管², 王小天²

[1. 中国石油 东方地球物理公司研究院, 河北涿州 072750; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要: 钻前压力预测在保障钻井安全、选取合理的钻井液密度、设计科学的井身结构、降低钻井成本和保护油气层方面都具有十分重要的意义。由于测井资料不足和地震资料的多解性, 钻前压力预测的精度常常达不到钻井的要求。本次研究以伊拉克西南部的A油田为研究区, 针对该区深层探井资料少和地震响应复杂的两个难点, 以地震资料为基础, 充分结合区域地质和浅层测井资料, 从压力的成因研究出发, 查明了研究区超压主要受侧向构造挤压和深部断裂引起的流体充注两种因素的控制, 在此基础上优选出了基于地震资料的钻前压力预测方法, 开展了井震联合上覆地层压力预测、地质一致性精细速度解释和地震速度变化率分段求取三项参数精度提升工作, 预测出了深层探井侏罗系的孔隙压力系数为1.95~2.05。经钻井验证, 压力预测成果与实测结果的相对误差小于3%, 证实该方法能够提高钻前孔隙压力预测的精度。

关键词: 孔隙压力; 压力预测; 深层探井; 侏罗系; 伊拉克

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Pre-drilling pore pressure prediction based on seismic data for exploratory well: Oilfield A in Iraq

Chen Xin¹, Wei Xiaodong¹, Li Yanjing¹, Xia Yaliang¹, Zhou Xiaoming¹,
Wang Gan², Wang Xiaotian²

[1. Geophysical Research Institute, BGP, CNPC, Zhuozhou Hebei 072750, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Pore pressure prediction before drilling is of great significance for ensuring drilling safety, choosing reasonable drilling mud density, designing well configuration, reducing drilling cost and protecting reservoirs. The accuracy of pressure prediction usually is not sufficient for drilling requirement due to a lack of logging data and multi-interpretation of seismic data. This paper focuses on an oilfield A in southwest of Iraq. To tackle the problem of inadequate exploration well data of deep layers and complicated seismic responses, we combined seismic data with regional geology and shallow well logging data to study the mechanisms behind pressure. We found out that the study area was controlled by fluid charging caused by lateral tectonic extruding and deep faulting. An optimized method for pre-drilling pressure prediction was picked out and improvement on the precision of the pore pressure calculating parameters was achieved through overburden pressure prediction based on seismic-well-integration, seismic velocity analyses based on geological consistency, and variation rate of seismic velocity estimation. Pore pressure coefficient of exploratory well in deep Jurassic was predicted to range between 1.95 and 2.05. The prediction was verified by actual measurement with an error less than 3% only.

Key words: pore pressure, pressure prediction, deep exploratory well, Jurassic, Iraq

孔隙压力是石油勘探开发工作中的基础数据之一。在石油勘探过程中, 孔隙压力为油气的分布、运移、聚集提供重要信息, 有利于提高探井成功率^[1-2]。在钻井过程中, 孔隙压力不仅是确定钻井液密度、井身结构的依据, 而且关系到能否安全、快速、经济地实施

钻井, 甚至影响到钻井的成败^[3]。随着勘探开发的深入, 目标逐渐转向深层, 井喷带来的巨大灾难让越来越多的石油工作者认识到钻前孔隙压力预测的重要性^[4-9], 油田也迫切需要准确的钻前孔隙压力预测资料来降低投资风险。本次研究从伊拉克A油田深层

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-10-28。

第一作者简介: 陈鑫(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 油藏综合地质研究。E-mail: chenxinupc@qq.com。

基金项目: 中国石油股份公司科技重大专项(2011E-2501)。

探井异常压力的成因研究出发,通过地震-地质-测井一体化联合攻关,预测深层探井的孔隙压力,为钻井的顺利实施奠定基础。

1 区域地质特征

A油田位于伊拉克西南部,处于阿拉伯地台外侧,东北为扎格罗斯山前拗陷和扎格罗斯断裂带,西南为阿拉伯台地和阿拉伯地盾^[10](图1)。A油田的构造简单,为一个北西-南东方向的长轴背斜。盆地从寒武纪开始沉积,沉积地层总厚度可达12 000 m,包括碳酸盐岩、碎屑岩、膏岩和岩盐,基底为前寒武纪的花岗岩,侏罗系主要以膏岩、碳酸盐岩和泥页岩为主(图2)。目前勘探和开发的油层主要分布在白垩系,最大井深为4 790 m,钻穿层位仅为Yamama层。区域地质研究表明,该油田侏罗系依然有很大的勘探潜力^[10],油田在构造高部位设计了探井H10。然而,邻区深层探井揭示侏罗系为异常超压层,压力高达12 000~16 000 psi,压力系数高达2.1,这为侏罗系的勘探带来了很大的风险,H10井的钻前压力预测工作显得尤为重要。

2 超压成因分析

孔隙异常压力的形成条件很多,一种异常压力现象通常是由多种互相叠置的因素所致,Chilingar系统地总结了目前所认识到的异常压力的三类13种主要成因^[1]。

I类——岩石孔隙体积变化:①直载荷(欠压实);②侧向构造挤压;③次生胶结。

II类——孔隙流体体积变化:①温度变化;②矿物转化;③烃类生成;④烃类热降解;⑤断裂和流体充注。

III类——流体压力变化:①渗透作用;②流体压力头;③油田开采;④永冻环境;⑤流体密度差异。

伊拉克A油田深层探井异常孔隙压力的成因复杂,主要受侧向构造挤压和深部断裂引起的流体充注两种因素的控制,矿物转化、烃类生成与热降解和高地温也对孔隙异常超压有一定的影响。

2.1 侧向构造挤压

根据区域构造演化特征,伊拉克A油田所处的构造部位早期位于被动大陆边缘,沉积环境稳定,地层平缓。喜马拉雅期,阿拉伯板块与亚欧板块发生碰撞,扎格罗斯山脉形成^[10]。A油田为一个受到侧向构造挤压形成NW-SE走向的背斜(图3)。侧向构造挤压是A油田异常超压形成的主要因素之一。

2.2 深部断裂与流体充注

受构造侧向挤压的影响,伊拉克A油田在深部(Yamama层之下)形成了一条明显的NW-SE向的走滑断层,该走滑断层始于基底,局部延伸到Yamama层(图4,5)。断裂发育程度可以由最大正曲率来表征,曲率越大裂缝越发育。从曲率属性看,裂缝在平面上据有继承性,从深到浅,即从Najmah顶部到Yamama顶部,裂缝发育强度减弱。区域地质研究表明,该走滑断层是流体运移的主要通道^[10]。深部高温高压流体的充注容易产生Yamama-Triassic地层的异常超压。

目前,钻井Y005揭示的Yamama层的孔隙压力为12 438.43 psi(测试中心点深度为4 370 m),压力系数1.9。Yamama层岩性主要为碳酸盐岩,基岩致密,裂缝发育,溶孔被泥质充填,储集空间以裂缝为主,荧光灯下裂缝内可见白色荧光(图6)。该井试油的结果表明裂缝内充注有高压油气,日产油高达5 050桶。后期破裂作用产生的裂缝和深部高压流体的充注是该层异常高压形成的主要原因。

2.3 其他影响因素

伊拉克区域地质研究表明,伊拉克深部的侏罗系含有多套膏岩层和油页岩层^[10]。石膏向硬石膏的转化,蒙脱石向伊利石的转化和烃类的生成与降解都会产生大量的孔隙流体,导致孔隙流体体积增大,从而引起地层的异常高压。另外,钻井测试表明Yamama层的地温高达134℃,预计侏罗系的地温会更高,地层的受热膨胀可以加剧异常高压的形成。

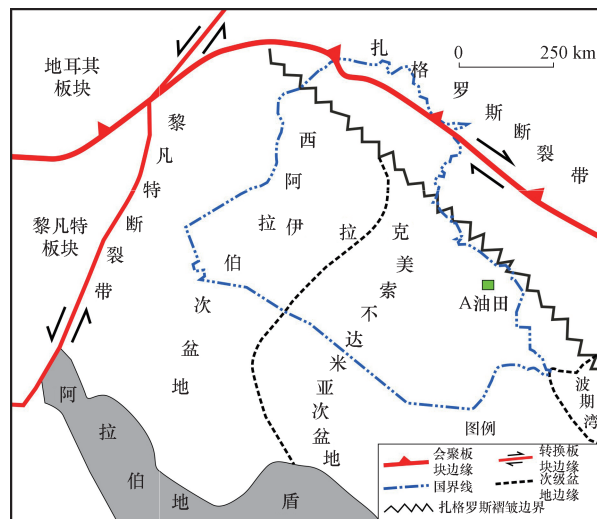


图1 油田位置及伊拉克区域地质图

Fig. 1 Sketch map showing the location of the oilfield and regional geological map in Iraq

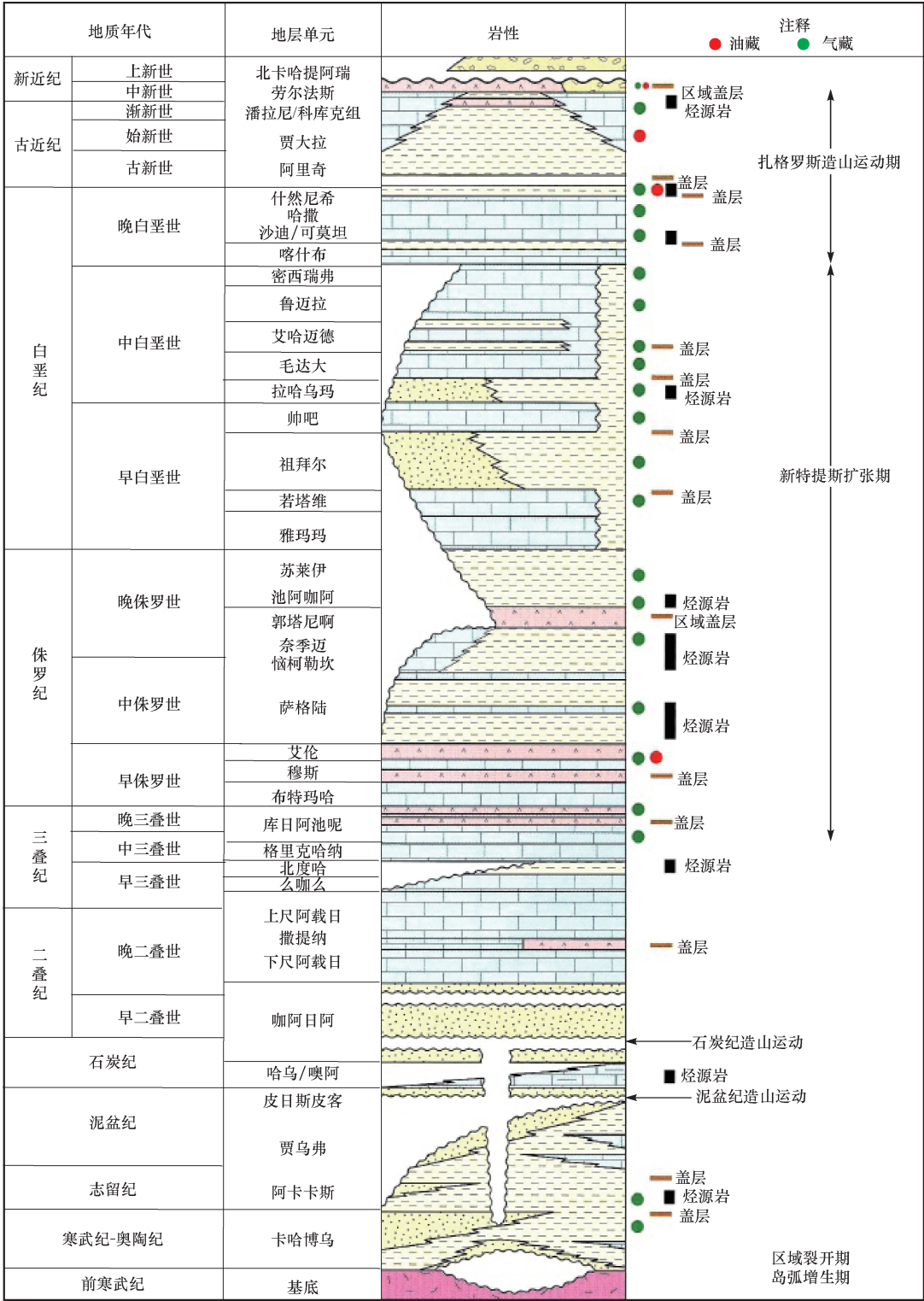


图 2 伊拉克 A 油田地层柱状图^[10]

Fig. 2 Stratigraphic distribution of source rocks, reservoirs and seals in the study area of Iraq

3 孔隙压力预测方法的选取与应用优化

3.1 孔隙压力预测方法的选取

Pennebaker1968 年首次将地震资料应用到钻前压力预测中^[11],近年来,地层压力钻前预测工作取得了

较大的进展^[1-9,12-14]。目前常用的孔隙异常超压预测方法主要可以分为三类。

- I 类——基于欠压实理论的孔隙压力预测方法:
①等效深度法^[15],②Eaton 公式法^[16-17]。
- II 类——基于测井资料的孔隙压力精细预测方法:
①Eberhart-Phillips 法^[18-19],②Bowers 公式法^[20]。
- III 类——基于地震资料的钻前孔隙压力预测方

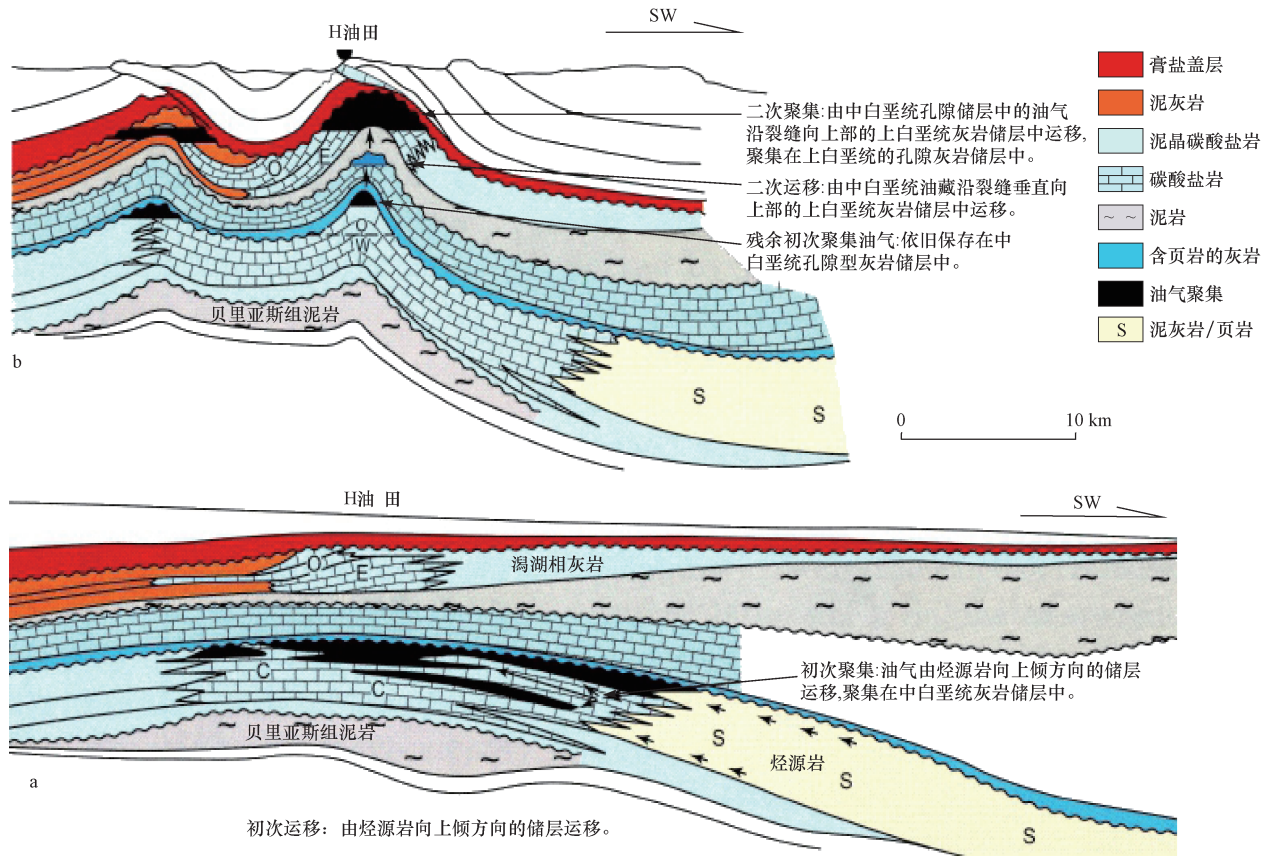
图3 伊拉克 A 油田构造演化与油气再次运移^[10]

Fig. 3 Tectonic evolution and remigration of hydrocarbons in Oilfield A, Iraq

a. 侧向构造挤压前; b. 侧向构造挤压后

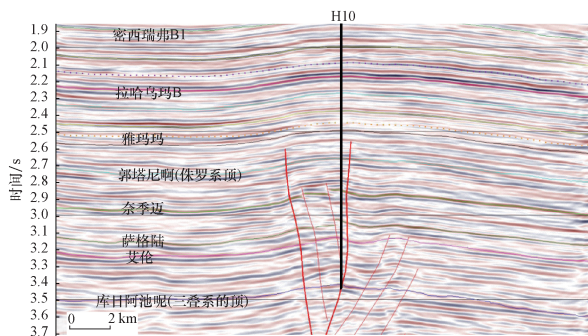


图4 过深层探井 H10 的地震剖面 and 走滑断裂特征

Fig. 4 Seismic section tied to the exploratory well H10 and strike-slip fault characteristics

法:①Fillippone 公式法^[21-22],②Fillippone 公式的修正方法^[15,23]。

这三类方法都具有各自的适用性。第Ⅰ类基于欠压实理论的孔隙压力预测方法,适用于欠压实成因的碎屑岩超压地层,而不适用于其它成因机制形成的碳酸盐岩地层。第Ⅱ类基于测井资料的孔隙压力精细预测方法是目前精度最高的一种压力预测方法^[19],然而该类方法需要测井资料来准确求取孔隙度、泥质含量、岩石密度和地层速度,一般只适用于探井完成以后对孔隙压力分布的再认识,而不适用于钻前探井压力预

测。第Ⅲ类基于地震资料的钻前孔隙压力预测方法,该类方法以地震资料为基础,结合区域测井资料和钻井资料进行孔隙压力预测,是研究区可用的一种压力预测方法。该类方法始于 Fillippone 以墨西哥湾等地区的地震速度为基础,结合测井和钻井资料综合建立的孔隙压力预测经验公式^[22]:

$$p = \frac{V_{\max} - V}{V_{\max} - V_{\min}} S, \quad (1)$$

$$V_{\max} = 1.4V_0 + 3kt,$$

$$V_{\min} = 0.7V_0 + 0.5kt,$$

式中: p 为孔隙压力, psi; $V_{\max}$ 为孔隙度接近于零时的骨架速度, m/s; V 为地震资料计算出来的层速度, m/s; $V_{\min}$ 接近于孔隙流体速度, m/s; V_0 为均方根速度在 t_0 时刻的截距, m/s; k 为速度随时间的变化率, 无量纲; t 为地震波旅行时, s; S 为上覆地层压力, psi。

由于 Fillippone 经验公式是以墨西哥湾地区为基础建立的,应用到其它地区时往往需要经过修正,云美厚引入了一个随速度变化的校正系数来进一步修正 Fillippone 公式,提高了 Fillippone 经验公式的精度^[15]。根据伊拉克 A 油田 H10 探井在侏罗系尚无

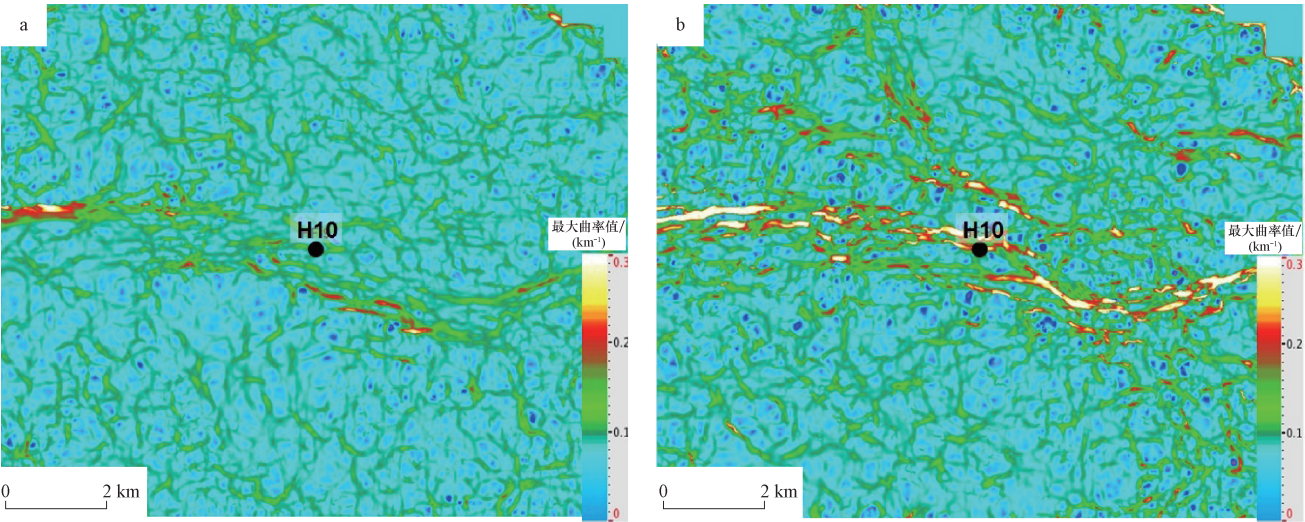


图 5 沿层最大正曲率特征
Fig. 5 Planar distribution characteristics of the most – positive curvature along the horizon
(a. Yamama 层顶部;b. Najmah 顶部)

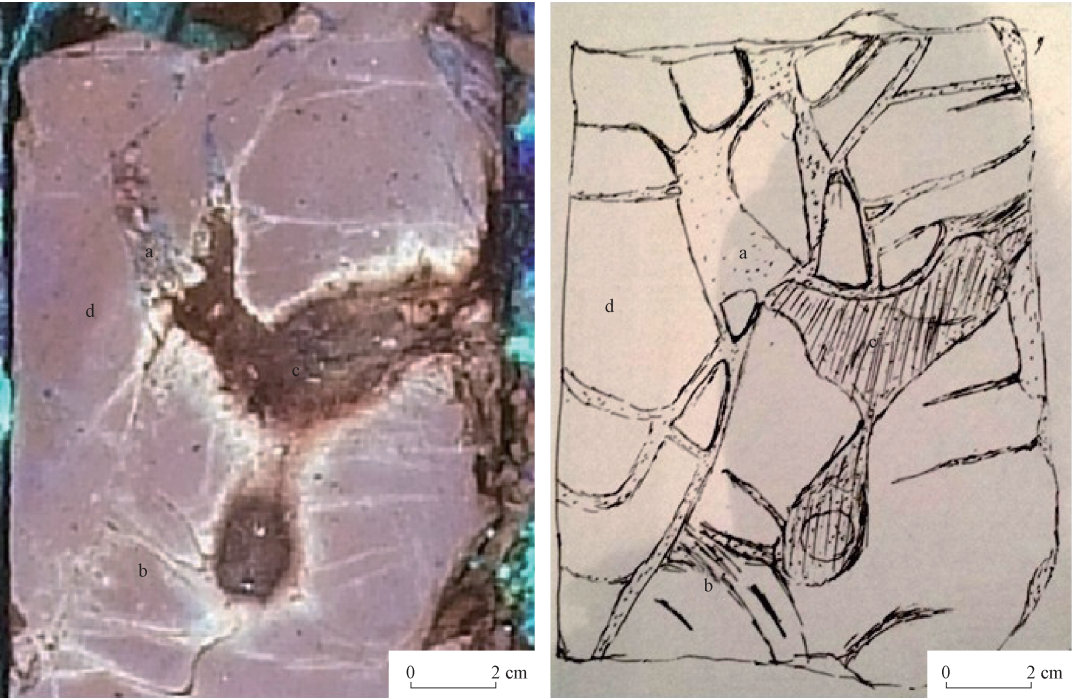


图 6 Y005 井岩心照片(荧光灯下)和岩心素描图
Fig. 6 Photo(under fluorescent light) and sketch map of core from well Y005
a. 主裂缝;b. 小裂缝;c. 泥质充填溶蚀孔隙;d. 致密围岩
注:岩心层位:雅玛玛,深度:4 357.3 m。

测井资料和孔隙压力成因复杂的实际情况,目前仅有第Ⅲ类基于地震资料的钻前孔隙压力预测方法可用。

3.2 孔隙压力预测方法的应用与优化

从 Fillippone 经验公式来看,孔隙压力的准确预测是建立在合适的上覆地层压力 S 、合理的地震速度(层速度 V 和均方根速度 V_0)和科学的速度变化率 K 这三个条件之上的。下面将讨论在应用 Fillippone 经验公

式时如何优化这三个条件项。

3.2.1 应用井震联合方法优化上覆地层压力 S 预测

井震联合可以提高上覆地层压力预测的精度^[24]。通过井震联合方法,选取与预测井 H10 地震响应一致、处于同一沉积相带、距离最近的浅层钻井和邻区钻井作为参考井,预测各地层的岩性(图 7)。参考浅层钻井和邻区钻井的密度测井曲线,选取合适的岩层密度,估算地层的上覆地层压力 S (图 8)。

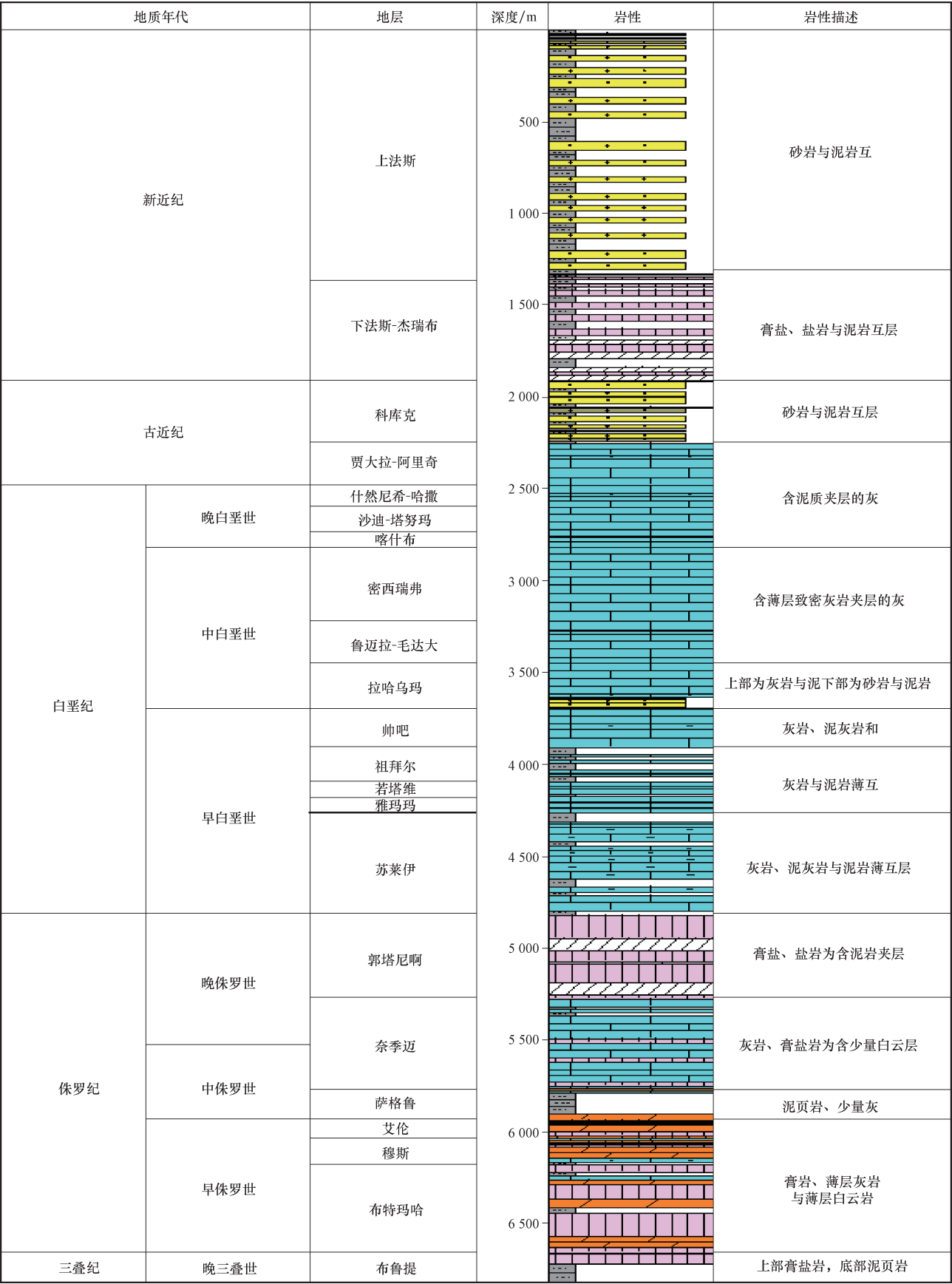


图 7 H10 井的地层岩性预测

Fig. 7 Lithologic prediction of well H10

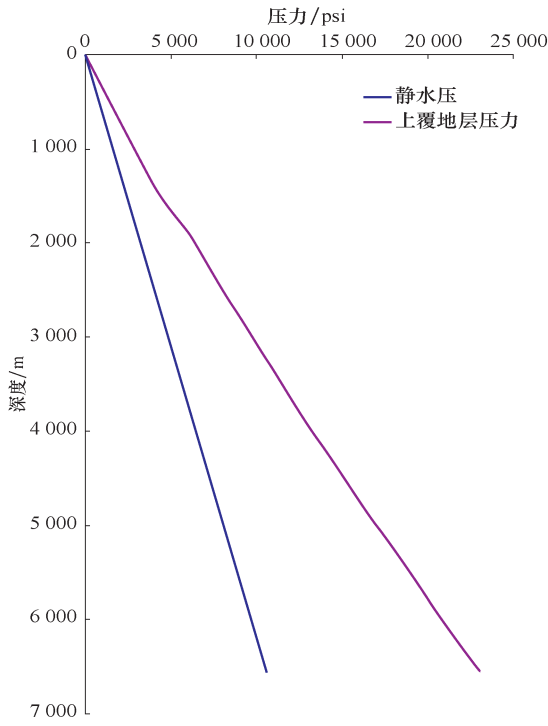


图8 H10井的上覆地层压力与静水压力

Fig. 8 Overburden pressure and hydrostatic pressure of well H10

3.2.2 应用地质一致性方法优化地震速度解释

地震速度解释是孔隙压力预测的关键步骤,Cibin讨论了什么样的速度才能用来做孔隙压力预测,提出了结合地质和测井资料来优化地震速度解释的方法^[25]。该方法在岩性预测的基础上,结合声波测井估算的岩层速度,来指导地震速度分析,在遵守地震速度解释原的基础上,确保地震解释的速度反映的岩层变化规律能与地质认识保持一致,同时兼顾地震叠加成像的品质(图9)。

3.2.3 井震联合分段求取地震速度变化率

地震速度变化率 k 是 $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 求取的基础,对于复杂岩性和复杂成因机制的层段,地震速度变化率 k 需要分段求取^[26]。Fillippone经验公式是建立在单一碎屑岩工区之上的,研究区岩性复杂,不同的岩层具有不同的 k 值。以预测岩性为基础,结合地震速度特征,分岩性段分别求取地震速度变化率 k ,能够使 k 值更加符合地震速度的变化规律(图10)。

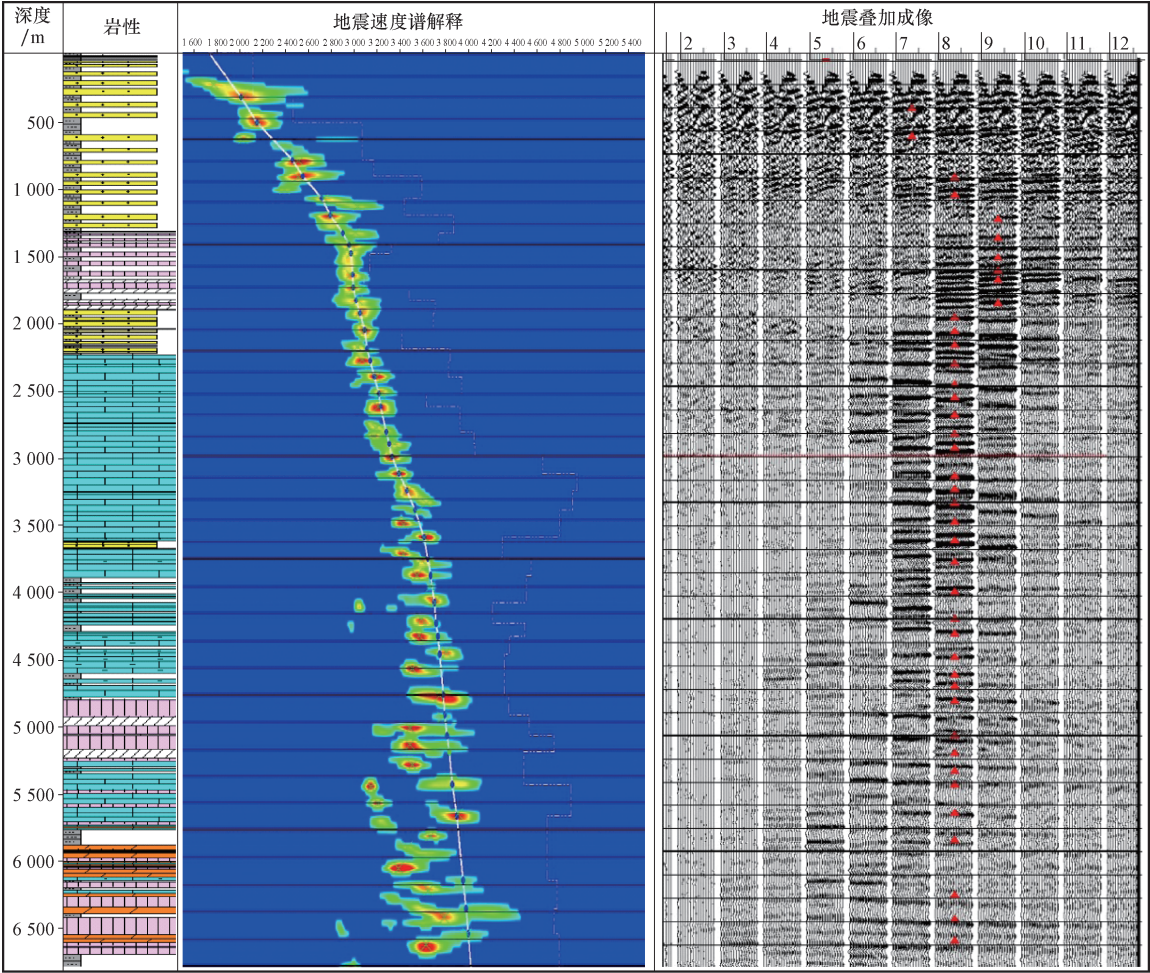


图9 基于地质一致性的地震速度分析

Fig. 9 Seismic velocity analyses based on geological consistency

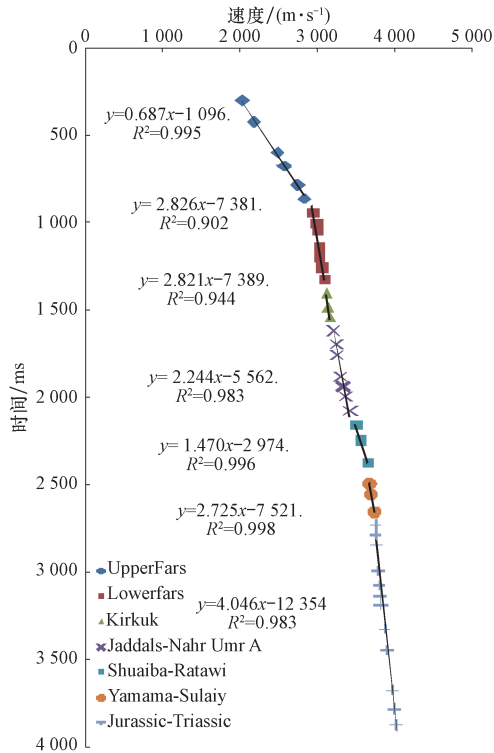


图10 地震速率变化率

Fig. 10 Variation rate of seismic velocity

4 孔隙压力预测与应用效果分析

利用 Fillippone 经验公式和云美厚修正公式分别计算 H10 的孔隙压力(图 11),侏罗系孔隙压力分布在 12 000 psi ~ 16 000 psi,压力系数分布在 1.85 ~ 2.1。

通过钻前地震压力预测结果与实测压力结果对比图可以看出,地震压力预测结果与实钻压力测试结果在趋势上是一致的,据统计压力预测与实测结果的误差较小,基本上小于 3%。在浅层,利用 Fillippone 经验公式计算的地层压力与实测压力吻合程度高,这是由于浅层有钻井资料和测井资料,上覆岩层压力和地层速度的求取更加可靠。在深层,压力预测误差相对较大,这主要是因为深层岩性预测参考的是邻区的钻井资料,由于两口井相距较远,导致误差相对较大。另外,研究区深层断裂发育,并且分布不均,这也是误差相对较大的另一个原因。云美厚修正公式法,能降低压力预测成果的系统误差,使地震压力预测的总趋势更加吻合,但是不能从本质上修正深层由于复杂地质条件产生的误差。

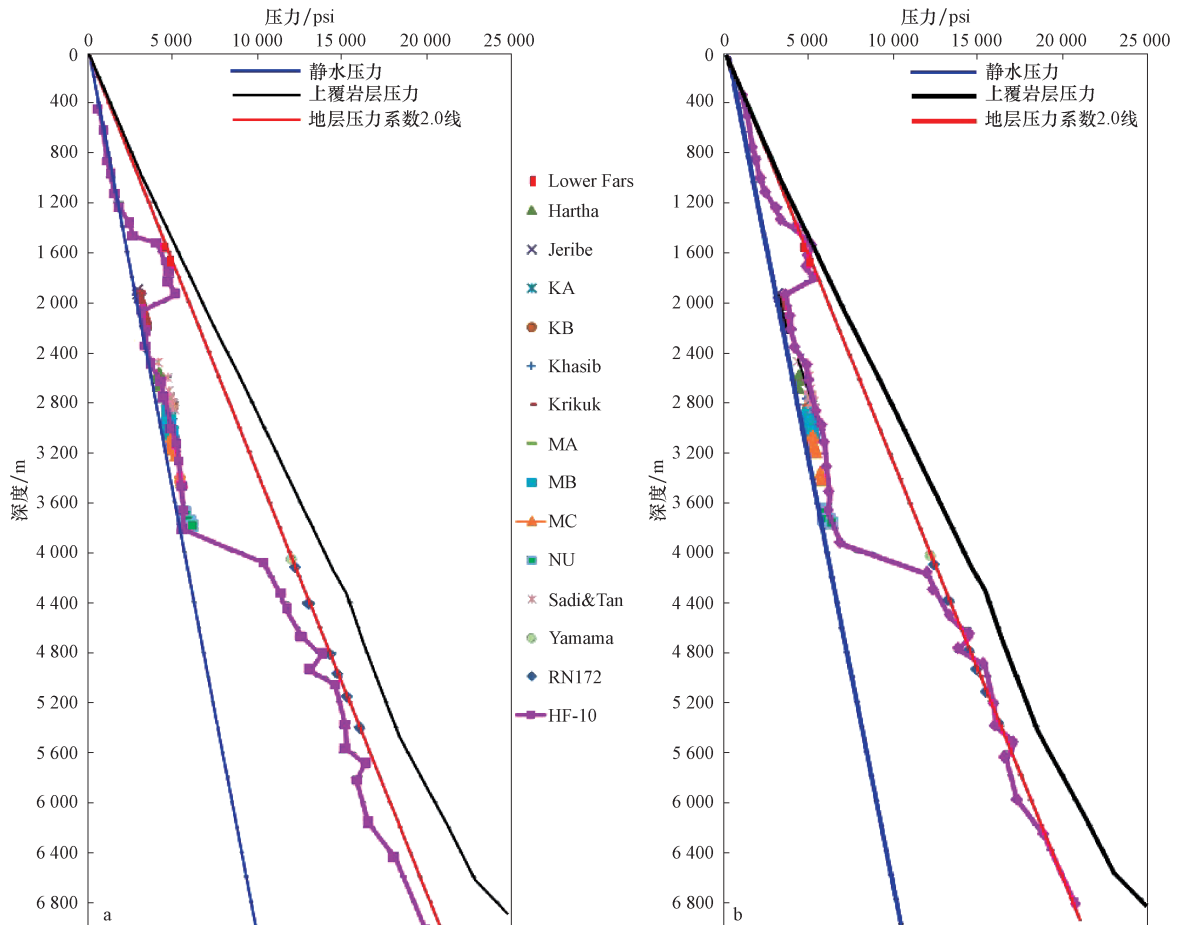


图11 孔隙压力预测结果与实钻压力测试结果对比

Fig. 11 Comparison of pore pressure prediction results with pressure test results

a. Fillippone 公式法; b. 云美厚修正公式法

(玫瑰线为预测压力,点为研究区实测压力点)

5 结论

伊拉克 A 油田深层探井异常孔隙压力的成因复杂,主要受侧向构造挤压和深部断裂引起的流体充注这两种因素的控制。地震-地质-测井有机结合能够提高上覆地层压力、地震速度解释和地震速度变化率的合理性,为准确预测钻前孔隙压力奠定基础。在研究区预测了侏罗系的孔隙压力分布在 12 000 ~ 16 000 psi,压力系数分布在 1.8 ~ 2.1,与实钻压力测试结果趋势吻合,相对误差基本上小于 3%。对于钻前深层压力预测由于缺乏准确的岩性资料、密度资料和速度资料,再加上地震分辨率和深层断裂的影响,孔隙压力预测的误差比浅层的误差要大,建议钻井工程人员进一步根据随钻压力检测成果合理进行泥浆密度调整,确保钻井的安全进行。

参 考 文 献

- [1] 赵文智,柳广弟,苗继军,等.异常地层压力成因与预测[M].北京:石油工业出版社,2004:100-131.
Zhao Wenzhi, Liu Guangdi, Miao Jijun, et al. Abnormal pore pressure formation mechanism and prediction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 100-131.
- [2] 王兴岭,冯斌.井约束地震压力预测在滚动勘探开发中的应用[J].石油地球物理勘探,2002,37(4):391-394.
Wang Xingling, Feng Bin. Seismic pressure prediction constrained by well applies in rolling exploration and development[J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2002, 37(4): 391-394.
- [3] Daniel Mujica, Abdulfattah Aldajani. Pore pressure prediction from 3D seismic data: a feasibility study for unconventional gas in Saudi Arabia [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2013, 83th: 2331-2335.
- [4] Niranjana Banik, Adam Koesoemadinata, Charles Wagner, et al. Predrill pore-pressure prediction directly from seismically derived acoustic impedance [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2013, 83th: 2905-2909.
- [5] Krongrath Suwannasri, Namfon Pooksook, Paveen Suthisripok, et al. Seismic velocity-based pore pressure and fracture gradient prediction in high temperature reservoirs: Bongkot field, Gulf of Thailand [C]. Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2013, 83th: 2336-2340.
- [6] Banik N Wool, G den Boer, L Mao, et al. Regional and high-resolution 3D pore-pressure prediction in deep-water offshore West Africa [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2003, 73rd: 1386-1389.
- [7] Nader C Dutta, Jalal Khazanehdari. Estimation of formation fluid pressure using high-resolution velocity from inversion of seismic data and a rock physics model based on compaction and burial diagenesis of shales [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2006, 76th: 1528-1539.
- [8] Alan R. Huffman and Richard W. Lahann. Geophysical Fluid Pressure Prediction in The Presence of Multiple Pressure Mechanisms and Complex Geology with Applications to Deep Wells [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2008, 78th: 2673.
- [9] 袁静,陈鑫.济阳坳陷古近系深部储层成岩-孔隙演化模式[M].东营:中国石油大学出版社,2011.
- [10] Deng Xiaowu. The petroleum geology in Iraq[M]. Electronic publishing of Iraq, 2010.
- [11] Pennebaker E S. Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure[J]. World Oil, 1968, 166: 73-78.
- [12] Dutta N. Geopressure prediction using seismic data: current status and the road ahead[J]. Geophysics, 2002, 67: 2012-2041.
- [13] Gary Yu. How does seismic data quality influence pore pressure estimation and interpretation? [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2009, 79th: 3208-3212.
- [14] Rajive Kumar, Mariam A Al-Saeed, Jassim M, et al. Seismic based pore pressure prediction in a West Kuwait field [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2010, 80th: 2289-2293.
- [15] 云美厚.地震地层压力预测[J].石油地球物理勘探,1996,31(4):575-586.
Yun Meihou. Prediction of seismic formation pressure[J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 1996, 31(4): 575-586.
- [16] Eaton B A. Graphical method predicts geopressures worldwide[J]. World Oil, 1972, 51-56.
- [17] Eaton B. The equation for geopressure prediction from well logs [C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, 1975, 5554: 1-5.
- [18] Eberhart-Phillips D, Han D, Zoback M. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity and clay content in sandstone[J]. Geophysics, 1989, 54: 82-89.
- [19] 樊洪海.利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法与应用[J].石油钻探技术,2001,(29):9-11.
Fan Honghai. Simple method and application to detect abnormal high pressure of uncompacted mudstone using sound velocity[J]. Petroleum Drilling Technology, 2001, (29): 9-11.
- [20] Bowers G. Pore pressure estimation from velocity data: accounting from overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10: 89-95.
- [21] Fillippone W R. On the prediction of abnormally pressured sedimentary rocks from seismic data [C]//Offshore Technology Conference, 1979: 2667-2676.
- [22] Fillippone W. Estimation of Formation Parameters and the Prediction of Overpressures from Seismic Data [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1982, 62nd: 502-503.
- [23] 刘震,张万选.辽西凹陷北洼下第三系异常地层压力分析[J].石油学报,1993,14(1):14-23.
Liu Zhen, Zhang Wanxuan. An analysis of abnormal formation pressure of Paleogene in the north sag of Liaoxi depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(1): 14-23.
- [24] Mita Sengupta, Jianchun Dai. Building a seismic-driven 3D geomechanical model in a deep carbonate reservoir [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2011, 81th: 2069-2073.
- [25] Cibin P, Martera M, Buia M, et al. What seismic velocity field for pore-pressure prediction? [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2004, 74th: 1531-1534.
- [26] Y. Ranjeet Singh, Metilda Pereira, R. K. Srivastava, et al. Regional Pressure Compartmentalisation Preview using Pore Pressure Approach-A Case study from NE India [C]//Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2010, 80th: 2217-2230.

(编辑 董立)