

文章编号: 0253-2697(2007)06-0092-05

储层精细预测技术在周青庄油田的应用

苏明军^{1,2} 王西文² 刘彩燕² 易定红² 袁克峰³

(1. 中国石油大学资源与信息学院 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院西北分院 甘肃兰州 730020;
3. 中国石油国际海外研究中心 北京 100083)

摘要: 周青庄油田小断裂发育,构造复杂,油气分布受构造和储层变化的控制。利用等时地层对比技术和基于小波变换的地震相干体技术,研究了断裂分布;综合测井和地震数据进行沉积相反演和沉积相控制下的相控储层预测技术,研究了储层空间展布。应用储层精细预测技术,对周青庄油田古近系 S_3^4 油组的构造和储层砂体展布规律进行了分析和预测,提出了井位部署意见,钻井后获得了高产工业油流,扩大了含油面积,增加了石油地质储量。

关键词: 周青庄油田;储层特征;小波变换技术;储层预测技术;沉积相反演

中图分类号: TE133 **文献标识码:** A

Application of high-precision reservoirs prediction techniques in Zhouqingzhuang Oilfield

Su Mingjun^{1,2} Wang Xiwen² Liu Caiyan² Yi Dinghong² Yuan Kefeng³

(1. School of Resource and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Northwest Branch, Petrochina Exploration and Development Research Institute, Lanzhou 730020, China;
3. CNPC International Research Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Zhouqingzhuang Oilfield was characterized by numerous local faults and complicated structure. The spatial distribution of hydrocarbon accumulation was predominated by the structure and lateral variations of reservoir formations. A new set of high-precision reservoir prediction techniques was applied in the oil and gas pay zones of this oilfield. The prediction techniques include the recognition technique of fault system based on integration of time-stratigraphic correlation and 3D seismic coherence cube processed by wavelet transformation, the sedimentary facies recognition technique by integration of well log and seismic attributes, and the high vitality 3D reservoir attributes outlining based on high precision reservoir prediction controlled by sedimentary lithofacies. The structural features and 3D distributions of sand bed attributes of the Paleogene S_3^4 reservoir in Zhouqingzhuang Oilfield were delineated with above techniques. A new well planning project was made. As a result, many new wells acquired high-yielded oil flow. Furthermore, pay zone extension was confirmed, and the oil reserves in place increased by 1.89 million tons.

Key words: Zhouqingzhuang Oilfield; reservoir property; wavelet transformation technique; reservoir prediction technique; sedimentary facies inversion

周青庄油田位于黄骅拗陷歧口凹陷,横跨南、北大港 2 个二级构造带,由南、北两部分组成。北部属于港西突起南翼,为断鼻构造;南部属于南大港构造带西北斜坡的一部分。两者之间以鞍部相连。古近系 S_3^4 油组是本区主要目的层段之一,是一个多沉积体系叠置的扇三角洲前缘沉积综合体。由于研究区构造复杂,小断裂发育,储层横向变化大,油气分布受构造和储层变化的控制,制约了油田进一步开发,完钻井尚少。为此,采用了储层精细预测技术,对构造及储层空间展布规律进行研究。

1 储层精细预测技术研究流程

储层精细预测技术研究流程(图 1)主要包括 3 个部分:①构造精细解释,确定构造形态及断层空间展布,为砂体的精细预测奠定基础;②精细小层对比及沉积相研究,正确认识砂体及其油层的分布规律,为储层反演奠定基础;③储层测井响应分析及相控储层反演,通过储层敏感曲线分析、曲线重构和相控反演,研究储层空间分布规律,为井位部署提供依据。

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技攻关项目(ktkj-2-2-3)“岩性油气藏地震资料处理解释一体化研究”部分成果。

作者简介: 苏明军,男,1970 年 2 月生,1991 年毕业于中国石油大学(华东),现为中国石油勘探开发研究院西北分院高级工程师,中国石油大学(北京)在读博士研究生,主要从事沉积储集层研究。E-mail: smj1310@126.com

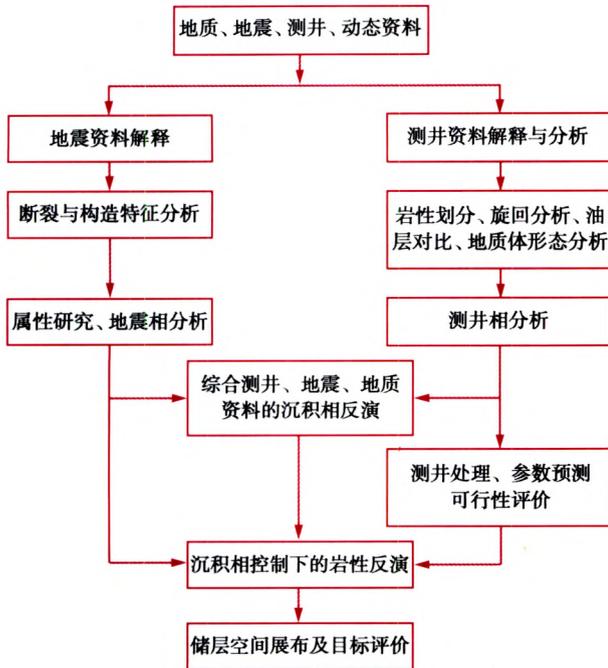


图 1 储层精细预测流程

Fig. 1 Flow chart of high-precision reservoir prediction

随着资料的增加及更新,以上步骤可迭代式循环进行。

2 等时小层对比

小层对比是构造解释与储层预测的基础。对该研究区曾作过小层对比工作,并将 S_3^5 油组划分为 3 个小层。但随着钻井数量增加,以往的分层已难以满足油田开发需要,井间矛盾也逐渐显露出来。根据储层精细预测要求,通过对测井曲线的分析发现:自然电位曲线能反映各类岩性的孔隙、渗透性以及各级旋回的组合特征;声波时差曲线能清楚地反映标准层、油层的储油物性、泥岩和砂岩的岩性特征;深侧向曲线能反映各类岩层的储油性能、各级旋回的组合特征、标准层特征及沉积韵律特征。综合应用 3 条曲线能满足本区小层对比要求。

根据层序地层学和测井地质学理论,采用相控-等时地层对比方法^[1], S_3^5 油组从上至下可划分为 S_3^{5+1} 、 S_3^{5+2} 、 S_3^{5+3} 、 S_3^{5+4} 共 4 个小层。在电阻率曲线上形成四组高阻齿尖,层与层之间有稳定的泥岩隔层,电阻曲线呈低值。各小层地层厚度呈东厚西薄、北厚南薄的特点。从工区内已钻穿 S_3^5 油组的多口井分析, S_3^{5+4} 小层砂体主要发育在工区南部,钻遇井少,具有砂体厚度大(4~9 m)及产量高的特点,是增储上产的首要目的层。

3 地震资料精细解释

影响本区地震资料解释的主要问题是断层识别,

应用基于小波变换的地震相干方法^[2],落实本区微小断层和断裂分布。

设地震信号 $s(t)$ 的小波变换为

$$s(b, a) = s_R(b, a) + i s_I(b, a) \quad (1)$$

式中 b 为时间因子; a 为尺度因子; $s_R(b, a)$ 为小波变换的实部; $s_I(b, a)$ 为小波变换的虚部。

对应不同尺度因子 a 下:瞬时振幅定义为

$$e(b, a) = \sqrt{s_R^2(b, a) + s_I^2(b, a)} \quad (2)$$

瞬时相位为

$$\theta(b, a) = \arctan \frac{s_I(b, a)}{s_R(b, a)} \quad (3)$$

瞬时频率为

$$\omega(b, a) = \frac{d}{db} \arctan \frac{s_I(b, a)}{s_R(b, a)} \quad (4)$$

3.1 基于瞬时相位的相干体算法

道位置 (x_i, y_i) 和 (x_{i+1}, y_i) 为数据道的 l 延迟的互相关系数 ρ_x 为

$$\rho_x(b, l, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-\omega}^{+\omega} \theta(b-\tau, x_i, y_i) \cdot \theta(b-\tau-l, x_{i+1}, y_i)}{\left[\sum_{\tau=-\omega}^{\omega} \theta^2(b-\tau, x_i, y_i) \cdot \sum_{\tau=-\omega}^{\omega} \theta^2(b-\tau-l, x_{i+1}, y_i) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中 2ω 为相关时窗长度; θ 为瞬时相位。

道位置在 (x_i, y_i) 和 (x_i, y_{i+1}) 的数据道的 m 延迟的互相关系数 ρ_y 为

$$\rho_y(b, m, x_i, y_i) = \frac{\sum_{\tau=-\omega}^{+\omega} \theta(b-\tau, x_i, y_i) \cdot \theta(b-\tau-m, x_i, y_{i+1})}{\left[\sum_{\tau=-\omega}^{\omega} \theta^2(b-\tau, x_i, y_i) \cdot \sum_{\tau=-\omega}^{\omega} \theta^2(b-\tau-m, x_i, y_{i+1}) \right]^{1/2}} \quad (6)$$

纵测线(l 延迟)和横测线(m 延迟)的相关系数 ρ_{xy} 的 3D 估计为

$$\rho_{xy} = \sqrt{[\max \rho_x(b, l, x_i, y_i)] [\max \rho_y(b, m, x_i, y_i)]} \quad (7)$$

式中 $\max \rho_x(b, l, x_i, y_i)$ 和 $\max \rho_y(b, m, x_i, y_i)$ 分别表示在延迟为 l 和 m 时, ρ_x 和 ρ_y 的最大值。

3.2 相干体的分频计算与重构

根据式(5)至式(7)计算出的相干体仅是在一定频带下的相干体,利用多个频带重构相干体,定义为

$$\rho_{xy} = \sum_{i=1}^{N-1} b_i \rho_{xy}(a_i, a_{i+1}) \quad (8)$$

式中 b_i 是重构系数, $b_i \in [0, 1]$ 。

采用该方法对地震数据进行处理,计算出的相干体断层信息丰富,不同层次的断层都能清楚显示,准确落实了工区内断裂分布(图 2),取得了好的效果。

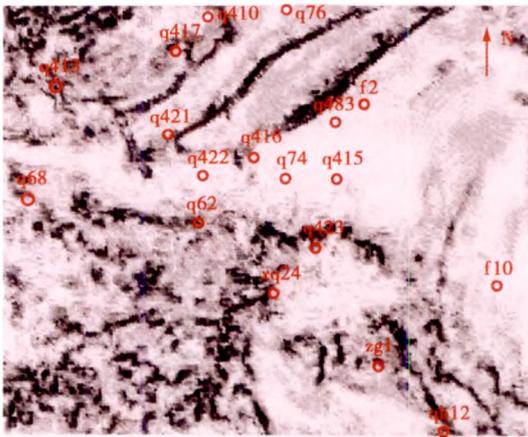


图 2 小波域沿 S_3^{+4} 层计算的相干体切片

Fig. 2 Horizontal slice of wavelet domain regenerated coherence cube along pay zone S_3^{+4}

4 基于储层特征参数反演的储集层定量评价

地震反演技术从 20 世纪 70 年代诞生以来得到了广泛的应用^[3-4]。同时在应用中也发现了许多问题,迫使人们对该技术的使用条件和改进方法进行探索^[5-7]。

4.1 沉积相研究

根据该区多口井的岩电特征和测井相分析, S_3^{+4} 小层在工区北部以湖相泥岩沉积为主,砂体主要发育在 xq24 井区(见图 3),岩性为分选较好的中细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩,偶见砂岩与灰绿色泥岩呈互层出现。在垂向上,自下而上呈由细变粗的韵律,自然电位

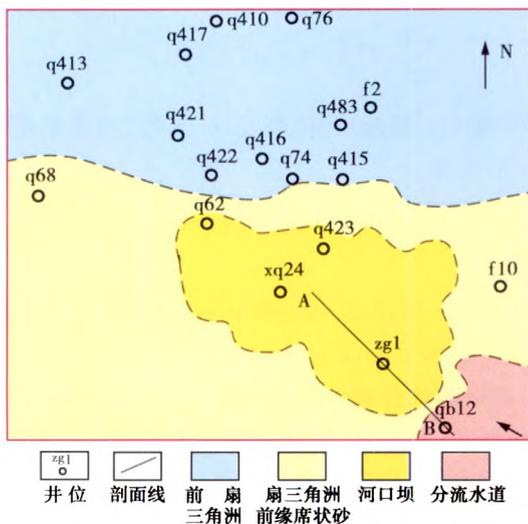


图 3 S_3^{+4} 小层沉积微相

Fig. 3 Sedimentary micro facies of pay zone S_3^{+4}

曲线呈中高幅漏斗形和微齿化箱形,沉积类型为典型的扇三角洲前缘河口坝微相。但井间的沉积相边界依靠井上资料无法明确。因此,利用三维地震资料进行地震相分析。

地震资料在沉积研究方面有其独到的作用^[8],鉴于 S_3^{+4} 小层砂体厚度较薄,利用小波变换式(3)计算瞬时相位,并沿参考标志层向上做水平切片的方法研究工区沉积变化。图 4 给出 S_3^{+4} 小层沉积时的瞬时相位切片,从图 4 中可以看到,地震属性可分为 3 类,即红黄色区域、绿色区域和蓝色区域。通过已知井的标定可以发现,红黄色区域对应于砂岩发育区,如 xq24 井砂体(约 9 m);蓝、绿色区域砂岩不发育,如 q415 井砂体。其他地震属性分析结果与此类似。

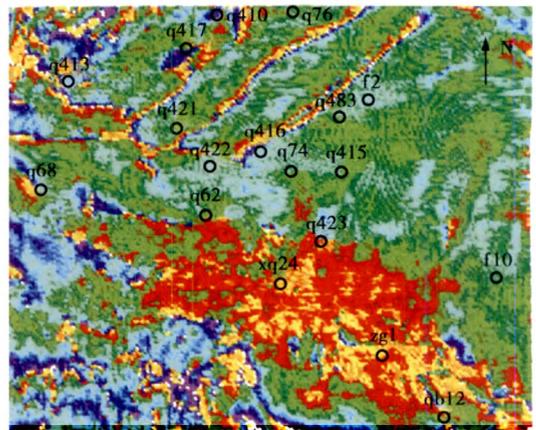


图 4 小波域沿 S_3^{+4} 小层的瞬时相位切片

Fig. 4 Horizontal slice of wavelet domain regenerated simultaneous phase cube along pay zone S_3^{+4}

结合地震相分析的结果,基本确定了异常区的大体范围(图 4 中红黄色区域)。这为沉积相反演和岩性反演初始模型的建立奠定了基础。

4.2 结合测井、地震和沉积学数据进行沉积相反演^[9]

通过地震属性分析,得到了地震相数据体 $\{G_1, \dots, G_m\}$,并进一步使用钻井数据来评价相关概率,其定义为

$$p(F_v | G_i) = \{ \text{当属于地球物理相 } G_i \text{ 时,} \\ \text{属于地质相 } F_v \text{ 的概率} \} \quad (9)$$

可用此条件概率来构造 DSI 约束条件集合,即

$$\alpha \in G_i \Rightarrow \varphi_v(\alpha) = p(F_v | G_i) \quad (10)$$

式中 α 为采样点位置, φ 为每个样点 α 位于相 F_v 的概率。以此概率估计作为软约束,以井上相类型作为硬数据,采用 DSI 算法可得到各类相的空间展布。

4.3 拟测井曲线反演

在建立初始模型时采用以下步骤:①精细井震标定和构造解释,根据解释成果建立宏观地层框架模型,

该模型包括有断层、整合、削截、上超等地层接触关系。
②在同类相中,通过该类相中的井上模型道内插建立模型数据,从而将沉积信息引入初始模型,得到最终的反演初始模型。可采用3种方法内插,即协克里金插值法、根据地震属性与井中内插数据的统计关系进行内插和根据距离反比加权法进行内插。

建立反演初始模型后,进行测井约束反演。图5是反演得到的过 qb12 井的岩性剖面(剖面位置见图3中AB),图5中红黄色代表储层,兰绿色代表非储层。

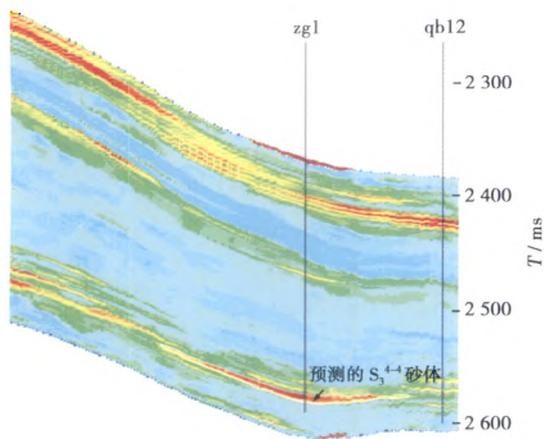


图5 反演得到的过 qb12 井的岩性剖面

Fig. 5 Lithological section along Well qb12 derived from seismic inversion

虽然 qb12 井的 S_3^4 砂体很薄,但由于 qb12 井往北逐渐进入砂坝主体,在 zg1 井区反演得到的砂体厚度约 6 m(zg1 井为参考研究成果后钻的井)。

5 预测效果

根据相控储层预测结果,在该区先后完钻了 13 口井,全部钻到预测的油层,预测成功率为 100%。在 zg1 井, S_3^4 砂体预测厚度为 6 m,实测厚度为 6.4 m,其他井预测砂层厚度误差最大不超过 2 m。扩大了含油面积,新增石油地质储量 189×10^4 t。

6 结论

储层预测技术是描述储集体空间展布形态的重要技术手段,针对陆相复杂断块油田的特点,采用基于小波变换的地震相干技术落实小断层,综合测井和地震资料,进行了沉积相反演和沉积相控制下的岩性反演技术精细预测目的层段砂体空间展布,成功预测了周青庄 S_3^4 砂体的分布及厚度,为油田开发提供了依据。

参考文献

- [1] 王西文,苏明军,王大兴,等.相控-等时小层对比方法及应用[J].石油勘探与开发,2003,30(6):78-80.
Wang Xiwen, Su Mingjun, Wang Daxing, et al. Method and application of facies controlling isochrone oil-layer[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 78-80.
- [2] 王西文,杨礼庆,周立宏,等.基于小波变换的地震相干体算法研究[J].地球物理学报,2002,45(6):847-852.
Wang Xiwen, Yang Kongqing, Zhou Lihong, et al. Methods of calculating coherence cube on the basis of wavelet transform[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(6): 847-852.
- [3] 邹才能,李明,赵文智,等.松辽南部构造-岩性油气藏识别技术及应用[J].石油学报,2004,25(3):32-36,43.
Zou Caineng, Li Ming, Zhao Wenzhi, et al. Recognition technique and application of structure-lithology pool in the south of Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 32-36, 43.
- [4] 张研,张颖,孙夕平,等.地震储集层预测技术在不同勘探开发阶段的应用[J].石油勘探与开发,2006,33(1):59-63.
Zhang Yan, Zhang Ying, Sun Xiping, et al. Application of seismic reservoir prediction techniques in different exploration and development stages[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 59-63.
- [5] 王西文,刘全新,赵应成,等.小波域的波阻抗反演方法[J].石油地球物理勘探,2000,35(1):89-96.
Wang Xiwen, Liu Quanxin, Zhao Yingcheng, et al. A method for wave impedance inversion in wavelet domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(1): 89-96.
- [6] 赵国良,穆龙新,计智锋,等.苏丹 M 盆地 P 油田退积型辫状三角洲沉积体系储集层综合预测[J].石油勘探与开发,2005,32(6):125-128.
Zhao Guoliang, Mu Longxin, Ji Zhifeng, et al. Reservoir prediction of the retrogradation braided delta depositional system of P Oilfield in the M Basin, Sudan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 125-128.
- [7] 尹兵祥,王尚旭,蔡国刚,等.辽河坳陷黄沙坨油田沙三段粗面岩储层地震预测[J].石油学报,2005,26(3):33-36.
Yin Bingxiang, Wang Shangxu, Cai Guogang, et al. Seismic prediction of trachyte reservoir in third member of Shahejie Formation in Huangshatuo Oilfield of Liaohe Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 33-36.
- [8] 赵力民,彭苏萍,郎晓玲,等.利用 Stratimagic 波形研究冀中探区大王庄地区岩性油藏[J].石油学报,2002,23(4):33-36.
Zhao Limin, Peng Suping, Lang Xiaoling, et al. Application of stratimagic waveform classification technique to the research of lithologic oil reservoir in Dawangzhuang area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 33-36.
- [9] 孟小红,王卫民,姚长利,等.地质模型计算机辅助设计原理与应用[M].北京:地质出版社,2001:117-120.
Meng Xiaohong, Wang Weimin, Yao Changli, et al. Computer aided geological model design, theory and application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 117-120.