

文章编号: 0253-9985(2011)03-0375-07

井-震结合进行河流相储层非均质性表征 ——以渤海湾盆地黄河口凹陷渤中 263 油田为例

闵小刚^{1,2}, 陈开远¹, 范廷恩²

(1. 中国地质大学, 北京 100083 2. 中海石油 研究中心, 北京 100027)

摘要: 针对渤海湾盆地黄河口凹陷渤中 263 油田明化镇组下段浅水三角洲水下分流河道多次砂体表现出的强烈非均质性, 综合应用井-震数据、采用多种方法进行储层平面非均质性定量描述, 并体现到地质建模和井位部署中, 以降低储量风险、落实潜力、优化开发井位、指导 ODP 方案(整体开发方案)的编制和决策。岩石物理分析发现, 该油田以密度反演为主的拟阻抗可以很好地反映砂、泥岩的变化。通过阻抗体上提取的振幅和相干信息, 可以识别平面岩相变化、废弃河道、点坝以及小断层分布。这些信息可以在属性模拟时约束平面渗透率变化。对于强不连续位置, 还可以设置虚拟断层以表征砂体内部的不连通性。利用短时窗傅氏变换频谱分解技术以及差异频谱所反映的吸收衰减现象, 在频率域通过调谐振幅的成像特征研究了储层横向变化规律, 定量求取了砂体厚度, 并成功检测了含油气砂体。

关键词: 频谱分解; 井-震数据; 地质建模; 井位部署; 储层平面非均质性; 砂体厚度; 渤海湾盆地

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

Heterogeneity characterization of fluvial facies reservoirs through integration of seismic and logging data

—an example from Bozhong-263 oilfield in the Huanghekou Sag
the Bohai Bay Basin

Min Xiaogang^{1,2}, Chen Kaiyuan¹ and Fan Ting'en²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Research Center of CNOC, Beijing 100027, China)

Abstract Strong heterogeneity exists in multistage sandstone reservoirs of underwater distributary channel microfacies of shallow water delta in the lower Minghuazhen Formation in the Bozhong-263 oilfield Bohai Bay Basin. In this paper, we quantitatively describe the plane heterogeneity of reservoirs through integration of seismic and logging data. The quantitative description of heterogeneity is then to be taken into consideration in geologic modeling and well emplacement so as to reduce reserve risk, confirm the resources, optimize the location of development wells, direct the composing of Overall Development Plan and make other decisions. Petrophysical analysis indicates that the pseudo-impedance can differentiate the variety of sandstone and shale perfectly. The amplitude and coherence information extracted from the impedance volume can be used to identify the plane variety of lithofacies and the distribution of abandoned channel, point bar, and small faults. They also can be used to constrain the variety of plane permeability during petrophysical modeling. Some virtual faults can be introduced to reflect the interior disconnectivity of sand body. Besides, by using the spectral decomposition technique deriving from short time window Fourier transformation and the absorbing attenuation phenomenon in differential frequency spectrum, this paper studies the lateral variety of reservoir, quantitatively calculates their thickness. Hydrocarbon-bearing sand body is successfully detected in this way.

Key words spectral decomposition, seismic and logging data integration, geologic modeling, well emplacement, plane heterogeneity of reservoirs, thickness of sand body, Bohai Bay Basin

收稿日期: 2010-07-12 修订日期: 2011-05-02

第一作者简介: 闵小刚(1979-), 男, 工程师、博士生, 油藏地球物理。

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05024-001-06)。

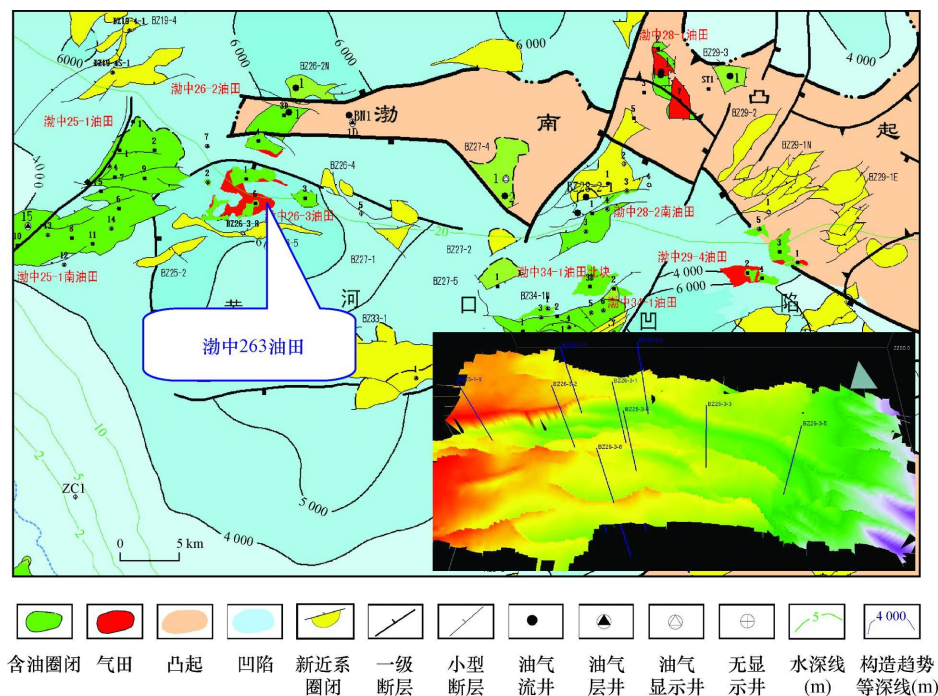
1 概况

渤中 263 油田位于渤海湾盆地黄河口凹陷的西北洼、渤南凸起西段南界大断层的下降盘,地势上西高东低。由于靠近郯庐断裂带,断裂活动比较强烈,断层发育^[1]。早期主要受渤南凸起边界断裂的影响,形成断裂背斜的构造背景;晚期受次级断层的影响,浅层构造复杂化,形成了一系列的断块构造。图 1 是该油田的区域构造位置图。综合区域沉积相研究和渤中 263 油田的岩心、壁心、岩屑和测井资料分析认为,该油田范围内明(明化镇组)下段 Nm^2 油组为主力油组,沉积上属于浅水三角洲相,进一步可分为浅水三角洲平原、浅水三角洲前缘和前浅水三角洲亚相,其中浅水三角洲前缘亚相占主导地位。由于湖水的波浪作用比较弱,沉积微相主要以水下分流河道为主,河口坝和远砂坝对不发育^①。

渤中 263 油田目前所用的地震资料为重新连片处理的迭前时间偏移数据体,采样间隔为 2 m s

最终处理面元为 25 m × 12.5 m,有效频宽大约为 5~ 85 Hz,主频约为 40 Hz,取平均速度 2 200 m/s 计算,地震资料纵向分辨率约为 14 m 左右。该区目前共钻井 8 口,其中 5 口井在明化镇组下段获得工业油气流,而 BZ263- 7 井在明下段仅钻遇油层 1.0 m, BZ263- 5 井和 BZ263- 8 井在明下段和馆陶组均未钻遇油气层,说明该区明下段油藏具有很强的隐蔽性和复杂性。

与陆上油田相比,海上油田对储层描述的精度要求更高。目前在储层非均质性描述方面,主要是从井数据出发,通过渗透率变异系数、突进系数、基尼系数的统计,分析层内(夹层)、层间(隔层)和平面非均质性^[2-3]。利用地震信息进行储层平面非均质性预测,尤其是在井数据较少的情况下,可以对砂体的几何形态、规模、连续性进行定性表征。综合应用纵向密集采样的井数据和横向分辨率较高的地震数据,采用多种地球物理方法进行井-震结合储层非均质性定量描述,并体现到地质建模和井位部署是一个新的趋势,尚属于探索阶段^②。



2 储层非均质性描述

渤中 263 油田明下段水下分流河道微相沉积时水动力条件变化大, 由于多期次分流河道砂体之间相互叠置、切割, 导致储层在平面和垂向上呈现强烈的非均质性^[4]。为搞清砂体间及内部横向的连通性, 本文综合应用井-震信息, 采用多种地球物理方法, 对计算储量的 13 个砂体进行了非均质性描述, 包括波阻抗信息识别砂泥岩岩性、相干体信息检测砂体内部不连续界面、短时窗傅氏变换确定砂体调谐厚度、频谱差异反映吸收衰减等。

2.1 波阻抗信息区分岩性

渤中 263 油田明化镇组及馆陶组测井曲线均为正常的砂、泥岩剖面响应特征, 自然伽马、自然电位、密度、中子及电阻率等曲线都能够较好地反映砂、泥岩及油、气、水层。砂岩段的自然伽马低、自然电位幅度异常明显; 在中子-密度交会图上, 砂岩及泥岩点区分明显, 含水纯砂岩点落在砂岩线附近(砂岩低速、低密)。在大部分层段, 油层及气层电阻率值明显高于水层电阻率值; 气层段中子与密度曲线存在明显的“镜像特征”, 易于判别。通过目的层段拟波阻抗(以密度为主)与校正后自然电位交会图分析可知, 低拟波阻抗对应储层(砂岩), 高拟波阻抗对应非储层(泥岩); 阻抗在横向上随自然电位值的增大而变小, 能够反映砂、泥岩变化规律。因此, 在波阻抗数据体上沿层提取振幅信息可以反映砂泥岩的平面分布特征, 是砂体内部岩性、岩相平面变化的一种很好的描述方式。

图 2 是 BZ263-1 井 1385 砂体在阻抗体上沿砂体包络面提取的均方根振幅属性。图上红色区域代表砂体相对发育部位, 蓝色区域代表砂体相对不发育部位, 1385 砂体测井解释有 7.2 m 的气层。从阻抗信息图上看, 钻井位置并不是砂体最发育的部位, 在它的东、西两侧都有规模更大、物性更好的砂体发育。这为下一步整体开发方案中的井位部署指明了方向。

2.2 相干信息识别不连续界面

相干数据体是利用数据间的差异性来检测地质信息的变化, 是多道数据间相似程度的一种度量, 它对检测断裂十分敏感^[5]。对于河流相储层,

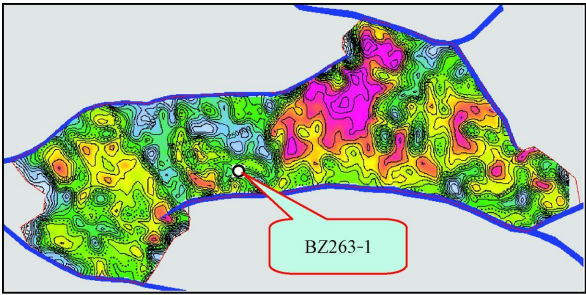


图 2 渤中 263 油田 BZ263-1 井 1385 砂体波阻抗信息区分岩性

Fig. 2 Lithology identified by impedance information of the No. 1385 sandbody in the BZ263-1 well in the Bozhong 263 oilfield
(红色代表砂体发育, 蓝色代表砂体不发育)

一般情况下断层和岩性的变化(如河道)都能形成窄带低相似性区域。利用这种信息, 可以区分不连续界面^[6-7]。

河道在演变过程中, 或整条河道、或某一段河道丧失了作为地表水通行路径的功能时, 原来的河道就变为废弃河道。河流相储层的废弃河道微相在侧向上对流体起阻挡作用, 在油田深度开发阶段是储层平面非均质性精细描述的关键、平面剩余油的重要影响因素^[8]。图 3 是 BZ263-1 井 1340 砂体在相干体上提取的均方根振幅属性。淡蓝色区域代表相对均质的部位, 绿色条带状部位是岩性、岩相发生变化的地方, 即不连续的区域。其中, 单轨的绿色条带已被证实是断层的反映; 而在砂岩背景下发育的双轨绿色条带(如图中椭圆所示区域)则是废弃河道的反映, 它们是先期的河道由于后期改道、被泥岩充填而形成的。在 BZ263-1 井附近, 可以看到多期这样的河道, 它们相互交叉、切割、叠合, 反映了古沉积环境中河道的频繁改道以及复杂的水动力条件。此外, 平面上废弃河道的位置一定与河道相毗邻, 位于单一河道砂体的凹岸边部, 成为单一河道砂体相带的边界。紧邻废弃河道分布是点坝最重要的识别标志^[9-10]。利用相干信息, 可以精确地找出砂体内部不连通的地方, 在保证断层刻画更为准确的同时, 提高了对河流砂体分隔性的认识, 为井网的合理部署、剩余油的调整挖潜提供了依据。

2.3 分频确定调谐厚度

对已钻遇的地震上可分辨的含油单砂体进行

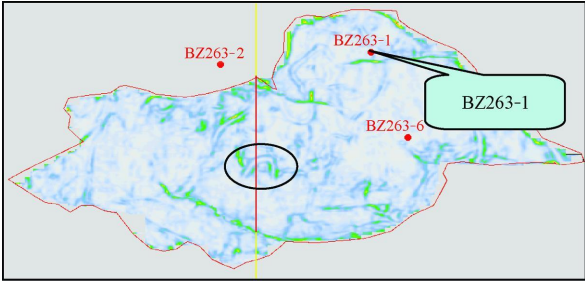


图 3 相干信息检测渤中 263 油田 BZ263- 1 井 1340 砂体内部不连续性

Fig 3 Internal discontinuity detected by coherent information of the No. 1340 sandbody in the BZ263-1 well in the Bozhong 263 oilfield (浅蓝色代表均质, 深绿色条带代表不连续位置)

定量描述, 达到探明储量计算的要求, 其技术关键是砂体厚度的定量求取^[11]。对于砂、泥岩薄互层来说, 地震剖面上每一同相轴都是一组岩性综合地震响应的结果, 且每个薄层产生的地震反射在频率域都有一个与之对应的特定的频率成分。根据薄互层反射的调谐效应理论, 我们采用短时窗离散傅氏变换的频谱分解技术, 实现了在频率域内通过调谐振幅的成像特征来研究储层横向变化规律的目标, 最大限度地挖掘了地震资料主频至高频端的地震分辨能力, 并使用调谐振幅方法定量计算了砂体厚度。

不同成像频率对应不同调谐厚度, 反映的地质体厚度亦不同。根据共振理论, 高频成分反映的砂比较细, 低频成分对应的砂比较粗^[12]。通过从低频到高频的逐次扫描, 观察不同频率成像能量平面位置的变化, 可判断研究区沉积物源方向、沉积相带变化及储层厚度相对变化趋势。此外, 通过提取第一谱峰频率 (调谐频率), 根据频陷周期的概念 ($p_f = 1/t$, 其中 p_f 为频陷周期, Hz, t 为时间, s), 即可计算出薄层的调谐厚度, 由此可以识别薄砂体的尖灭点, 判断工区内多期砂体的发育、叠置、切割情况, 为砂体的连通性作出合理解释。图 4 是目的层段分频结果的剖面显示。图 4a 为过 BZ263- 6 井的原始偏移地震剖面沿 Nm^2 油组顶面体拉平的结果, 研究对象为 Nm^2 油组下 0~20 ms 时窗范围; 图 4b 为 0~250 Hz 分频调谐体, 其中黄线代表的是调谐频率, 蓝线代表的是调谐厚度, 可见在断层与相变位置两条曲线都有明显

的起跳; 而在目的层段内, 至少有 4 期透镜状砂体, 在砂体快尖灭的位置 ($1/4$ 波长处), 都会产生相应的频陷, 两个频陷之间的距离就反映了薄层的时间厚度, 即频陷周期。

根据分频确定的主力砂体厚度在 12~26 m, 双程旅行时为 10~24 ms, 基本能够反映井点处钻遇油气储层的厚度信息。而根据实际地震资料, 目的层段的主频仅有 38 Hz, 若取储层的层速度 2 535 m/s, 该地震数据的分辨率能力也仅有 16.67 m 左右, 显然无法分辨小于 10 m 的储层, 更无法进行砂体定量解释。本文在深入研究楔形体薄层调谐效应的同时, 利用调谐频率成功地解释出小于 $1/4$ 波长的薄层, 从而为储量计算、油藏描述提供了基础。

2.4 频谱差异反映吸收衰减

地震波的吸收衰减信息是直接来自地震记录上的振幅信息变换来的, 在反映岩性、油气等方面, 其灵敏度要远高于振幅、频率和速度^①。在薄层情况下, 由于薄层的相长、相消干涉, 使得吸收衰减较为复杂, 一般称薄层吸收为视吸收系数。当薄层厚度恰是“调谐”厚度时, 反射波振幅可以达到正常反射振幅的两倍, 并出现主频升高现象, 显然

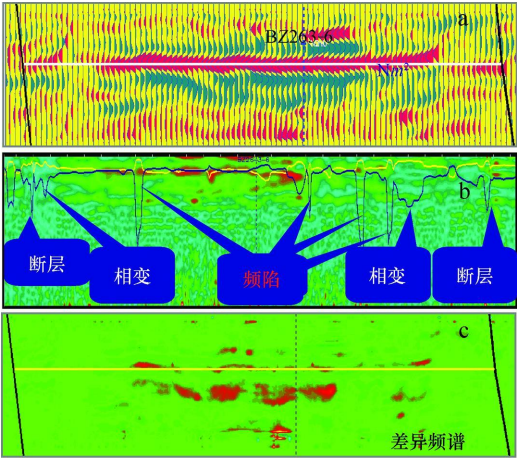


图 4 渤中 263 油田 BZ263- 6 井目的层段分频结果剖面显示

Fig. 4 Section showing spectral decomposition of targeted intervals of the BZ263-1 well in the Bozhong 263 oilfield
a 沿层体拉平的原始偏移剖面; b 分频调谐体;
c 频谱差异反映吸收衰减

① 李宗杰. 塔河油田缝洞储层模型的建立及其地震响应特征研究报告. 中石化西北油田分公司勘探开发研究院, 2006

求取的视吸收系数变小; 当薄层为相消干涉时, 也同样使得视吸收系数发生变化^[13]。为了科学应用频谱差异, 并确定哪两个频率成分之差最能反映薄层的吸收特征, 为实际生产提供理论指导, 有必要首先从数学上证明频谱差异与吸收系数之间的确定性关系。

已知输入频谱 $S(f)$ (无量纲; 其中, f 表示频率, Hz) 的重心频率 f_s (单位: Hz) 为:

$$f_s = \int_0 S(f) df / \int_0 S(f) df \quad (1)$$

方差 σ_s (无量纲) 为:

$$\sigma_s^2 = \int_0 (f - f_s)^2 S(f) df / \int_0 S(f) df \quad (2)$$

假定入射波的振幅谱具有正态分布, 即

$$S(f) = \exp[-(f - f_s)^2 / (2\sigma_s^2)] \quad (3)$$

则反射波的频谱差异 $\Delta R(\Delta f)$ (单位: Hz Δf 为某个频率与入射波的重心频率之差) 可以表示为:

$$\Delta R(\Delta f) = A \exp[-(\alpha_0 L \sigma_s^2 - \Delta f)^2 / (2\sigma_s^2)] \times [1 - \exp(-2\alpha_0 \Delta f)] \quad (4)$$

其中: A 为反射波振幅 (无量纲); L 为反射波传播距离, m; α_0 为介质的吸收系数, 无量纲, 通常是 10^{-5} 数量级。在研究的衰减介质厚度不是很大的情形下, $\sigma_s^2 L \alpha_0$ 相对于 Δf 可以忽略, 化简后得:

$$\Delta R(\Delta f) \approx 2AL\alpha_0 \Delta f \exp[-\Delta f^2 / (2\sigma_s^2)] \quad (5)$$

将 $A = G \exp(-f_s L \alpha_0) \approx G(1 - f_s L \alpha_0)$ 代入 (G 为仪器响应, 与频率无关), 并忽略 α_0 的高次项, 可以得到:

$$\alpha_0 \approx \Delta R(\Delta f) \exp[\Delta f^2 / (2\sigma_s^2)] / (2GL \Delta f) \quad (6)$$

该式表明, 可以利用关于入射波重心频率对称的两个频率对应的反射波的频谱值之差来计算介质的吸收系数, 进一步还可证明 Δf 等于入射波方差 σ_s 。倘若入射波的振幅谱形态不为正态分布, 而为其他类型的曲线, 也能得出上述类似的结论。此外, 由于研究人员经常假定入射波为雷克子波, 在进行实际资料处理时通常也要求进行最小相位反褶积, 使得实际子波比较接近于雷克子波, 而雷克子波振幅谱与正态分布比较逼近, 因此以上讨论不失一般性。

图 4c 是过 BZ263-6 井层拉平后的垂直地震剖面上由频谱差异所反映的吸收衰减情况, 红色代表频谱差高值区域 (反映吸收强烈)。目的层段共发育 4 期砂体。BZ263-6 井钻遇的砂体日产气 $34 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而其附近的两期砂体吸收异常更为明

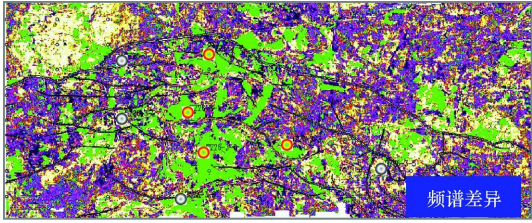


图 5 渤中 263 油田 Nm^2 以下 20 ms 范围内差异频谱水平切片

Fig 5 Horizontal slice of differential spectrum within 20 ms below Nm^2 surface in the Bozhong-263 oilfield (绿色、黄色、紫色分别代表频谱差异强、次强、弱)

显, 故含气的可能性更大, 在后期调整时可对其实施侧钻。图 5 是工区内 Nm^2 油组以下 20 ms 时窗范围内频谱差异水平切片, 其中绿色代表频谱差高值区。1, 3, 4, 6 井都打在频谱差异值大的高吸收区域, 钻井证实是油气的响应。其中, 1 井日产油 49.6 m^3 , 日产气 $6.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ (8.73 mm 油嘴); 3 井日产油 149.7 m^3 , 日产气 4278 m^3 (11.11 mm 油嘴); 4 井测井解释气层 7.3 m, 未试油; 6 井日产气 $34 \times 10^4 \text{ m}^3$ (12.70 mm 油嘴)。5, 7, 8 井未打到含油气砂体部位, 因此钻井过程中无油气显示。2 井频谱差异能量较弱, 吸收衰减特征不明显, 钻井证实是水层的响应。频谱差异可以很好地反映储层所含流体情况, 对开发阶段的烃类检测、储层识别、油藏描述非常适用。

3 应用

3.1 地质建模

目前大都把地质建模分为构造建模和属性建模两步, 在属性建模时普遍采用了相控思想。具体相控时, 可以是沉积微相控制物源、河道方向以及决口扇的形状, 通过基于目标或基于象元的方法模拟实现; 也可以是简单的岩相模拟, 通过反演数据确定砂泥岩平面分布范围。在此基础上, 通过某种能携带协变量的克里金方法将与插值地质属性相关的地震属性参数引入建模计算, 以确保建模精度^[14]。由于渤中 263 油田明下段整体处于浅水三角洲水下分流河道微相, 其沉积环境相对简单, 所以细分其中的砂泥分布、实现岩相模拟便显得尤为重要。

在前述储层非均质性描述的基础上, 本文将波阻抗数据体上提取的均方根振幅信息作为软数据, 通过与测井数据反映的岩性物性参数匹配, 将

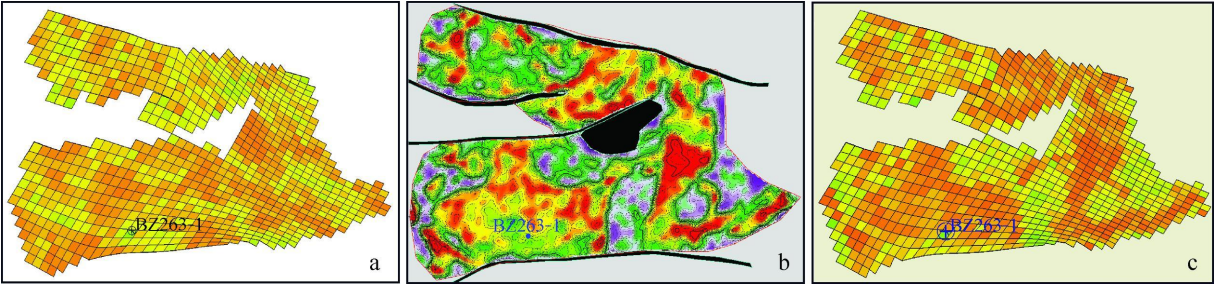


图 6 应用波阻抗信息约束渤中 263 油田 BZ263-1 井 1551 砂体的平均渗透率属性

Fig. 6 Average permeability attribute obtained through simulation under the constraint of impedance information in the No. 1551 sandbody of the BZ263-1 well in the Bozhong-263 oilfield

a. 根据井点数据模拟的渗透率; b. 波阻抗信息区分砂、泥岩性; c. 经波阻抗信息约束的渗透率

地震所反映的储层空间非均质信息赋予岩相、孔隙度和渗透率模型中。图 6 是 BZ263-1 井 Nm^2 油组 1551 砂体平均渗透率模型。图 6a 是无波阻抗信息约束时的情形; 图 6b 是阻抗体上提取的均方根属性 (可以很好地反映砂、泥岩性的空间变化); 图 6c 是经波阻抗信息约束后的情形。通过仔细对比可以看出, 在无波阻抗属性约束时, 通过随机模拟所生成的平均渗透率模型, 基本上不反映砂体内部的非均质情况; 而通过波阻抗约束, 砂体内部物性变差、储层不发育的地方表现得更明显, 可以认为是低渗透区。

根据类比经验, 影响本区储层连通性、进而影响储量及开发效果的主要因素是小断层和岩相变化。虽然它们基本上不控制油气的聚集, 但由于小断层影响注水开发油藏的水驱状况, 因而是剩余油富集的重要控制因素^[15-16]。对于这类储层, 非均质性方面的认识直接决定了对流体分布、储层连通性、水驱优势通道以及剩余油富集部位的认识。因此在开发前期研究阶段, 必须充分考虑和利用好能反映这些信息的资料, 把它们真实地体现在油藏地质模型中, 未雨绸缪, 尽量降低模型的不确定性和风险。根据前述相干体上的振幅信息所反映的不连续性, 在储层强不连续位置设置了虚拟断层, 并作为砂体内部不连通的方案推荐给油藏专业, 以便进一步进行开发指标敏感性分析。

3.2 井位部署和优化

在储量单元砂体非均质性表征及潜力砂体分析和评价的基础上, 地质、地震和油藏多专业人员联合互动进行了井位的部署和优化。原则是按砂体形态不规则布置井网, 首先动用优质储量, 采用

分期开采的开发思路以减少层间矛盾, 并充分利用水平井技术高速、高效开发油田^[17]。具体说来, 根据渤中 263 油田探明储量规模和储量分布情况, 开发方案中共设计了两个平台: A 平台负责 1、4、6 井区; B 平台负责 3 井区。将工区内所有动用砂体进行空间组合, 应用三维可视化技术, 可以更直观显示开发井井轨迹与钻遇砂体。同时, 通过砂体构造形态和岩性属性的叠合显示, 可以给油藏、地质和地震人员提供更多构造-岩性方面的三维空间信息, 使其得到更深刻的感性认识, 从而使开发井位的设计得到各个专业的认同。

4 结论

- 1) 渤中 263 油田明下段储层低速、低密, 以密度反演为主的拟阻抗可以很好地反映砂、泥岩的变化规律。通过阻抗体上提取的振幅和相干信息, 可以识别平面岩相变化、废弃河道、点坝以及小断层分布, 这些信息可以在属性模拟时约束平面渗透率变化。对于强不连续位置, 还可以设置虚拟断层以表征砂体内部的不连通性, 从而增强对水驱优势通道以及剩余油富集部位的认识。
- 2) 反射波的频谱差异与介质的吸收衰减有关, 关于入射波重心频率对称 (间距为入射波方差) 的两个频率对应反射波的频谱差最明显。通过频率域内调谐振幅成像特征, 可以研究储层横向变化规律, 计算薄层调谐厚度, 进而判断多期砂体叠置情况; 通过频谱差异反映的吸收衰减, 可以识别油气储层, 尤其是对气层更为敏感。
- 3) 海上油田井位部署时应该充分利用地震信息, 同时采用三维可视化显示手段, 有效监控井轨

迹与钻遇砂体情况, 为水平井的精确着陆保驾护航。在地质建模时, 充分利用好测井和地震所反映出的非均质信息, 约束油藏地质建模, 才能较为客观地反映地下地质特征。

参 考 文 献

[1] 姜丽娜, 邹华耀. 郑庐断裂带渤中- 渤南段新构造运动期断
层活动与油气运聚 [J]. 石油与天然气地质, 2009 30(4):
462- 468, 482
Jiang Lina, Zou Huayao. Fault activities and hydrocarbon migra-
tion and accumulation during the Neotectonic period in the
Bozhong-Bonan segment of the Tanlu fault zone [J]. Oil & Gas
Geology, 2009 30(4): 462- 468, 482

[2] 杨少春, 王瑞丽. 不同开发时期砂岩油藏储层非均质三维
模型特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(5): 652- 659.
Yang Shaochun, Wang Ruili. Characteristics of heterogeneous 3-
D model of sandstone reservoirs in different development stages
[J]. Oil & Gas Geology, 2006 27(5): 652- 659

[3] 陈刚, 王正, 陈清华, 陈堡油田陈 2 断块阜宁组阜三段储层非
均质性研究 [J]. 油气地质与采收率, 2009 16(2): 20- 23
Chen Gang, Wang Zheng, Chen Qinghua. Heterogeneity of the
third member of Funing formation, Chen2 fault block, Chenbao
Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,
2009 16(2): 20- 23.

[4] 崔永谦, 秦凤启, 卢永和. 河流相沉积储层地震精细预测方
法研究与应用——以渤海湾盆地冀中拗陷古近系河道砂
为例 [J]. 石油与天然气地质, 2009 30(5): 668- 672
Cui Yongqian, Qin Fengqi, Lu Yonghe. Research and applica-
tion of detailed seismic prediction in fluvial reservoirs—an ex-
ample from the paleogene channel sand in the Jizhong Depres-
sion, the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009 30
(5): 668- 672

[5] Sheriff R E, Gelfart L P. Exploration seismology [M]. London:
Cambridge University Press, 1999: 735- 736

[6] 凌云研究组. 基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究
[J]. 石油地球物理勘探, 2003 38(6): 642- 653.
Ling Yun Study Group. Study on application of basic seismic
attributes to interpretation of depositional environment [J]. Oil
Geophysical Prospecting, 2003, 38(6): 642- 653.

[7] 余德平, 曹辉, 郭全仕. 断裂系统解释与储层预测中的三维
相干技术 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(1): 100- 105.
She Deping, Cao Hui, Guo Quanshi. 3D coherence technique in
fault system interpretation and reservoir prediction [J]. Oil &
Gas Geology, 2007, 28(1): 100- 105

[8] 杨凤丽, 印兴耀, 吴国忱. 埕岛油田河流相储层地震描述方
法 [J]. 石油学报, 1999, 20(4): 24- 28
Yang Fengli, Yin Xingyao, Wu Guochen. A study on seismic de-
scription method of the fluvial facies reservoir in Chengdao oil-
field [J]. Acta Petroli Sinica, 1999 20(4): 24- 28.

[9] 刘波, 赵翰卿, 王良书, 等. 古河流废弃河道微相的精细描
述 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 394- 398
Liu Bo, Zhao Hanqing, Wang Liangshu, et al. The detailed de-
scription of ancient fluvial abandoned channel microfacies
[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 394- 398

[10] 李清仁, 陈守田, 张财, 等. 海拉尔盆地的古河道砂体识别
方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2006 41(4): 402- 407.
Li Qingren, Chen Shoutian, Zhang Cai, et al. Identified ap-
proach of palaeochannel sand body in Hailar basin [J]. Oil
Geophysical Prospecting, 2006, 41(4): 402- 404

[11] 徐丽英, 徐鸣洁, 陈振岩. 利用谱分解技术进行薄储层预测
[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(3): 299- 302
Xu Liying, Xu Mingjie, Chen Zhenyan. Using spectrum decom-
position technique for prediction of thin reservoir [J]. Oil Geo-
physical Prospecting, 2006, 41(3): 299- 302

[12] 凌云研究小组. 应用振幅的调谐作用探测地层厚度小于 1/4 波
长地质目标 [J]. 石油地球物理勘探, 2003 38(3): 268- 274
Ling Yun Study Group. Application of amplitude tuning in sur-
veying geologic target thickness less than 1/4 wavelength [J].
Oil Geophysical Prospecting, 2003 38(3): 268- 274

[13] 王者顺, 王尚旭, 唐文榜. 塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及
频率差异分析 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(1): 93- 101
Wang Zhesun, Wang Shangxu, Tang Wenbang. Seismic re-
sponse and frequency difference analysis of cavern type reser-
voirs in carbonates in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology,
2004 25(1): 93- 101.

[14] 胡水清, 韩大匡, 夏吉庄. 高含水期地震约束储层建模技术
[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 128- 134
Hu Shuiqing, Han Dakuang, Xia Jizhuang. Research on tech-
niques of reservoir geologic modeling constrained by seismic da-
ta at high water-cut stage [J]. Oil & Gas Geology, 2008 29
(1): 128- 134

[15] 李阳. 我国油藏开发地质研究进展 [J]. 石油学报, 2007 28
(3): 87- 92
Li Yang. Progress of research on reservoir development geology in
China [J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(3): 87- 92

[16] 李军, 宋新民, 薛培华, 等. 扶余油田杨大城子组曲流河相
油藏单砂体层次细分及成因 [J]. 石油与天然气地质,
2010 31(1): 119- 125.
Li Jun, Song Xinmin, Xue Peihua, et al. Hierarchical subdivision
and origin of single sandbody in the reservoirs of meandering riv-
er facies in the Yangdachengzi Formation of Fuyu oilfield [J].
Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 119- 125

[17] 夏同星, 李英, 黄江波. 渤南地区河流相油田开发地震研究
[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(增刊 1): 39- 43
Xia Tongxing, Li Ying, Huang Jiangbo. Research on seismic for
fluvial oilfield development in the southern Bohai Sea [J]. Oil
Drilling & Production Technology, 2009 31(S1): 39- 43.