

文章编号: 0253-9985(2007)05-0682-05

地震分频技术在扇三角洲演化过程研究中的应用

范洪军¹, 李 军^{1,2}, 肖毓祥^{1,3}, 胡庆松⁴

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油 玉门油田分公司, 甘肃 玉门 735200; 3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 地震分频是应用离散傅立叶变换 (DFT) 或最大熵方法, 将地震数据分解成不同频率域的调谐体技术, 该项技术一般应用在薄层预测方面的研究。根据储层的厚度及分布特征, 选择合适时窗参数, 提取地震主频率。根据地震主频在平面上的变化, 可以检测沉积体边界的变化, 为沉积相演化过程提供准确依据。根据地震主频率与储层厚度的转换关系, 可以进一步计算储层厚度。TLG 油田 J2 井区九佛堂组—沙海组地层发育扇三角洲沉积, 通过应用地震分频技术, 重点分析了研究区九佛堂组—沙海组扇三角洲的平面分布及其纵向演化规律, 判断了南部边界断裂处物源在不同时期的变化特征。实例应用显示, 该方法在克服常规预测沉积相边界不确定性的同时, 大大提高了常规地震相识别的精细程度。

关键词: 沉积体边界; 扇三角洲; 分频技术; 储集层厚度; 储层预测

中图分类号: P631.8 文献标识码: A

Application of seismic frequency-division technology in the study of fan-delta evolution

Fan Hongjun¹, Li Jun^{1,2}, Xiao Yuxiang^{1,3}, Hu Qingsong⁴

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Yumen Oilfield Company, PetroChina, Yumen, Gansu 735200, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

4. Langfang Branch Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract Seismic frequency-division is to transform seismic data into different frequency domains via the Discrete Fourier Transform (DFT) or the Maximum Entropy Method (MEM), and is generally used in the prediction of thin reservoirs. Based on the thickness and distribution of reservoirs, seismic primary frequency can be extracted through selecting appropriate parameters of time window. Plane changes of seismic primary frequency can then be used to detect edges of sedimentary bodies, thus providing reliable evidences for the study of fan-delta evolutionary process. The relationship of seismic primary frequency and reservoir thickness can also be employed to calculate thicknesses of thin reservoirs. By applying the technology in the analysis of the Jiufutang-Shahai Formations in J2 wellblock of the TLG Oilfield, where deposits of fan-delta facies are developed, the horizontal distribution and vertical evolution pattern of the fan-delta in the research area is defined and the changing characteristics of the source near the southern boundary faults during different times are determined. This field application shows that the technology eliminates the uncertainty of conventional methods for predicting the boundary of sedimentary facies and greatly enhances the accuracy of seismic facies recognition.

Key words sedimentary boundary; fan delta; frequency-division technology; reservoir thickness; reservoir prediction

收稿日期: 2007-07-08

第一作者简介: 范洪军 (1977-), 男, 博士生, 矿产普查与勘探

应用地震分频技术检测沉积体系的纵向及平面的空间演变,不但可以避免因地震采集、处理时振幅不一致导致的地震相解释的多解性,同时又提高了仅依赖振幅类或波形类地震属性信息进行沉积相研究的精度^[1 2]。在对 TLG 油田 J2 井区中生界白垩系下统沙海组—九佛堂组地层进行沉积相研究时,针对沉积相带平面变化快的难题,采用了地震分频技术预测沉积体系的分布,不但克服了井间预测沉积体边界的不确定性,同时也大大提高了常规地震相识别的精细程度,取得了明显效果。

1 分频技术原理及地质意义

地震分频技术是应用离散傅立叶变换 (DFT) 或最大熵方法,将地震数据体分解成不同频率域的调谐体技术(图 1)。其基本算法是离散傅立叶变换 (DFT)或最大熵方法,公式为^[3]:

$$F(m, \Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} f(n, \Delta t) e^{-2\pi j n \Delta f \Delta t} \quad (1)$$

式中: $F(m, \Delta f)$ 为离散傅立叶变换函数; $f(n, \Delta t)$ 为一系列小波函数; m 为频率域采样数; n 为时间域采样数; N 为时间域地震采样总数; Δf 为频率域采样间隔; Δt 为时间域采样间隔; j 为迭代次数。

从 (1) 式可以看出,实际地震波是复合波,常常是地下多个单砂层的综合响应。多个薄层反射组成的地震波在时间域会产生复杂的调谐反射,但地震信号经傅立叶变换后,对应每个单砂层都有一个与之相对应的特定频率成分,且这种频率

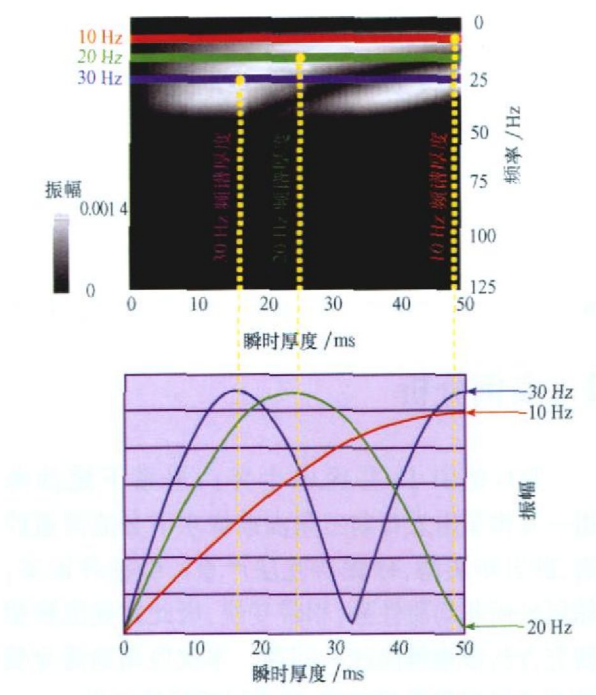


图 2 10 20 30 Hz 调谐体的时间厚度与频率的关系
Fig. 2 Relation of time thickness to frequency at 10 20 and 30 Hz

地震信号频谱分析结果受时窗影响比较大,长、短时窗的振幅谱频率响应差别很大,短时窗的振幅谱响应与时窗内地层的声波特性、厚度有着本质的内在关系。时窗越短,时窗所涵盖的地层信息的随机性就越少,地震道的振幅谱不再与子波频谱类似,而是更接近于地震子波频谱与局部地层的褶积,即目的层段小时窗内的地震响应作用于一个类似反射子波的局部滤波器,造成子波频谱随时间厚度变化而变化,从而提供了储集层地质信息^[5 6]。但是若采用时窗过短(小于

图 1 离散频率能量体的处理流程
Fig. 1 Processing chart for the energy body of dispersed frequency

根据地层的平均速度和地震主频计算得出储层调谐厚度。具体计算储层调谐厚度如下:

$$\Delta z_{\text{tuning}} = \lambda/4 = V/(4f) \quad (2)$$

式中: Δz_{tuning} 为调谐厚度, m; λ 为波长, m; V 为地层平均速度 m/s ; f 为地震主频, Hz

由 (2) 式可以看出, 储层调谐厚度与地震主频率呈反比关系。根据地震的主频率的高低直接确定储层的相对厚度, 但要预测储层实际厚度必须经过已知井点统计的实际储层厚度数据校正^[10~14]。

2 实例分析

TLG 油田 J2 井区中生界白垩系下统沙海组—九佛堂组发育扇三角洲前缘水下分流河道砂岩, 砂岩单层薄, 砂泥岩互层严重。经钻井证实, 储层平面非均质性强, 相带变快, 因此常规沉积相研究方法很难解决这一问题。本次应用地震分频技术开展沉积微相研究, 获得了很好的效果。

2.1 地质特征

TLG 油田 J2 井区南部发育一条边界同生断层, 控制着本区的沉积体系的分布。主要目的层自上而下是沙海组、九佛堂组, 主要发育为扇三角洲沉积, 呈现下粗上细的正旋回特征。沙海组上

部为灰色泥岩、细砂岩、粉砂岩不等厚互层; 下部为深灰色泥岩夹油页岩、钙质粉砂岩。九佛堂组分为上、下两段: 上段为灰褐色油页岩、深灰色钙质泥岩夹薄层砂岩, 其顶部有一段继承性低阻油页岩; 下段为灰色凝灰质砂岩、粉砂岩与深灰色凝灰质泥岩互层, 以富含凝灰质为特征。

2.2 扇三角洲平面识别

该区沙海组—九佛堂组地层单砂层薄, 且砂泥岩互层严重, 据多口钻井的取心资料及测井相分析, 沉积具有近物源、多期次的沉积特点, 传统沉积相研究难度较大。针对储层特征, 为了使地震分频技术结果客观、准确, 频率分析结果能够代表不同相带的岩性特征, 在频率分析时窗选择上必须包含几个同相轴。依据时间域地震数据体目的层解释结果, 沿主要目的层选取 60~100 ms 时窗, 基本包括目的层段有代表的 3 个同相轴, 这样进行地震分频处理后的结果才能比较可靠。

钻井统计结果表明, 本区主体水下分流河道单层砂岩厚度一般大于 15 m, 测井解释砂岩的声波时差值为 365~420 $\mu\text{s/m}$, 转换地层砂岩速度在 2 083~2 381 m/s 之间, 利用公式 (2) 计算得到水

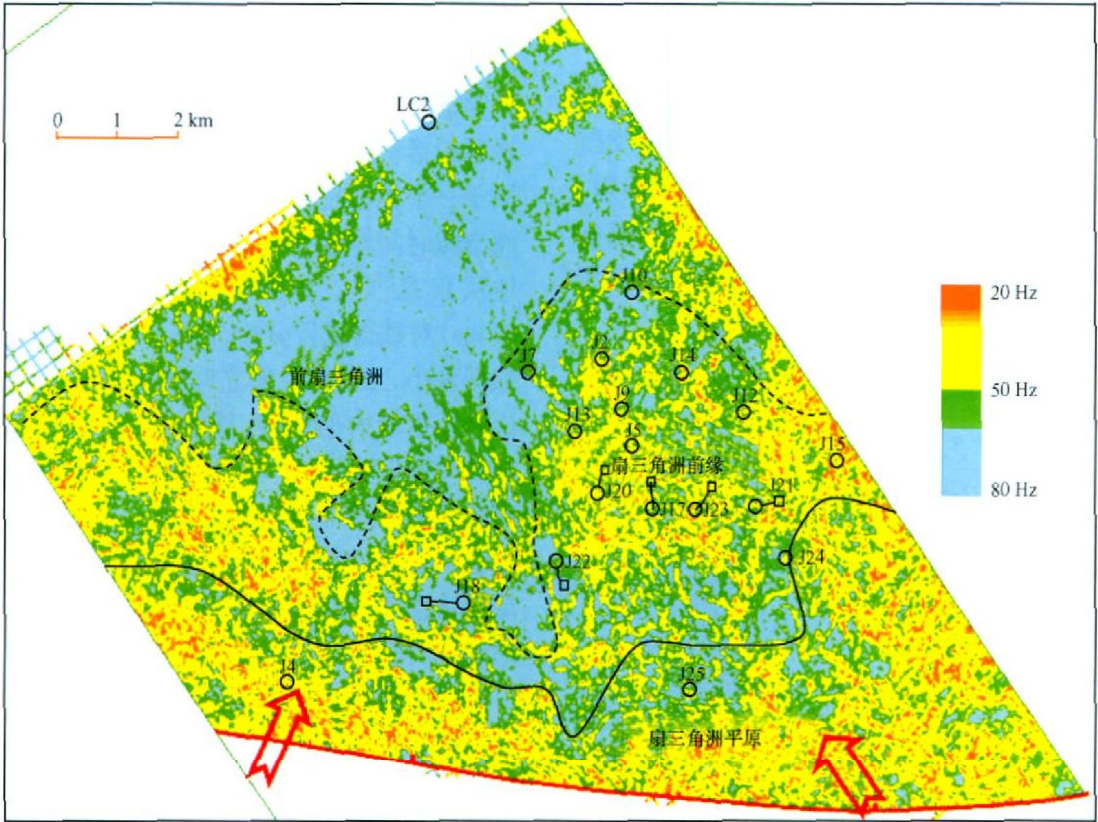


图 3 九佛堂组下段调谐体主频分布

Fig. 3 Distribution of the primary frequency for the Lower Jufotang Formation

下分流河道砂体的主频应该在 $21 \sim 46 \text{ Hz}$ 。根据以上分析,在地震分频处理后,提取地震数据的主频率的平面分布,在平面图上突出显示反映水下分流河道砂体的频率 ($20 \sim 50 \text{ Hz}$) 分布。结果表明,与常规时间域振幅、相位信息切片相比,目的层地震主频率在刻画地质体横向变化,展现沉积特征方面效果更佳。

采用上述方法得到的九佛堂组下段地层地震主频率平面分布图(图 3),该层段频率分布由南向北逐渐变高,呈扇形向北展开,反映了扇三角洲河道储层厚度由南向北逐渐变薄、连续性变差。将储层厚度、测井相与地震主频进行对比发现,当主频为 50 Hz 时,对应储层厚度约 10 m ;同时,测井曲线呈指状,为扇三角洲前缘亚相远端,是扇三角洲沉积体与湖相泥岩的分界处。根据地震主频的平面分布特点,结合井资料,认为靠近南部同生断层附近的较连续分布红色低频 ($20 \sim 30 \text{ Hz}$) 区为扇三角洲平原沉积区域,该区发育的辫状河道砂体单层厚度大于 27 m ,砂层连片性好,且向北逐渐变薄,在地震剖面上呈杂乱反射。反映出在构造作用控制下,本段扇三角洲沉积物具快速堆积,

分选差,结构成熟度低的特点。在工区中部,频率 $30 \sim 50 \text{ Hz}$ 的绿-蓝色中频区相间分布,储层厚度在 $11 \sim 27 \text{ m}$,反映了扇三角洲前缘水下辫状分流河道分布特征。北部,主频率大于 50 Hz 的蓝色区域,连片出现,反映了前扇三角洲-湖相沉积。应用分频技术不但精细刻画了九佛堂组扇三角洲的平面形态,而且也直观的展现了辫状分流河道、水下分流河道的分布特征。

2.3 扇三角洲的演化

依据以上方法,提取的九佛堂组下段、九佛堂组上段、沙海组三套地层的主频率的平面分布表明,低频区域主要分布在断层附近,并且连片出现,向北频率逐渐变高,呈条带状分布,表明扇三角洲由南向北展布。通过对比分析,各组地层的扇三角洲平面形态有所不同。

九佛堂早期处于凹陷强烈断陷阶段,随着南部边界断裂的活动增强,水体迅速变深,湖盆可容空间增大;南部隆起的不断抬升,地层剥蚀作用增强,物源供给充足,断层下降盘发育扇三角洲-深湖体系,使得九佛堂早期扇三角洲十分发育,垂直

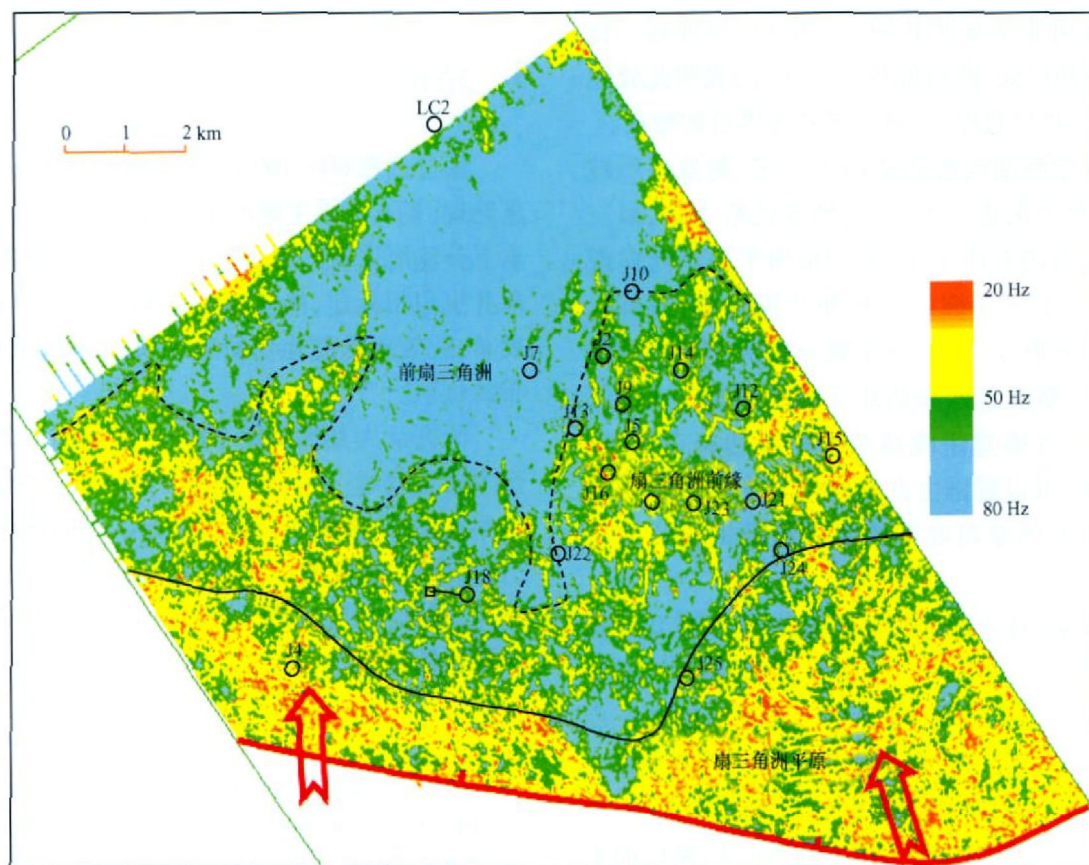


图 4 九佛堂组上段调谐体主频分布

Fig. 4 Distribution of the primary frequency for the Upper Jufotang Formation

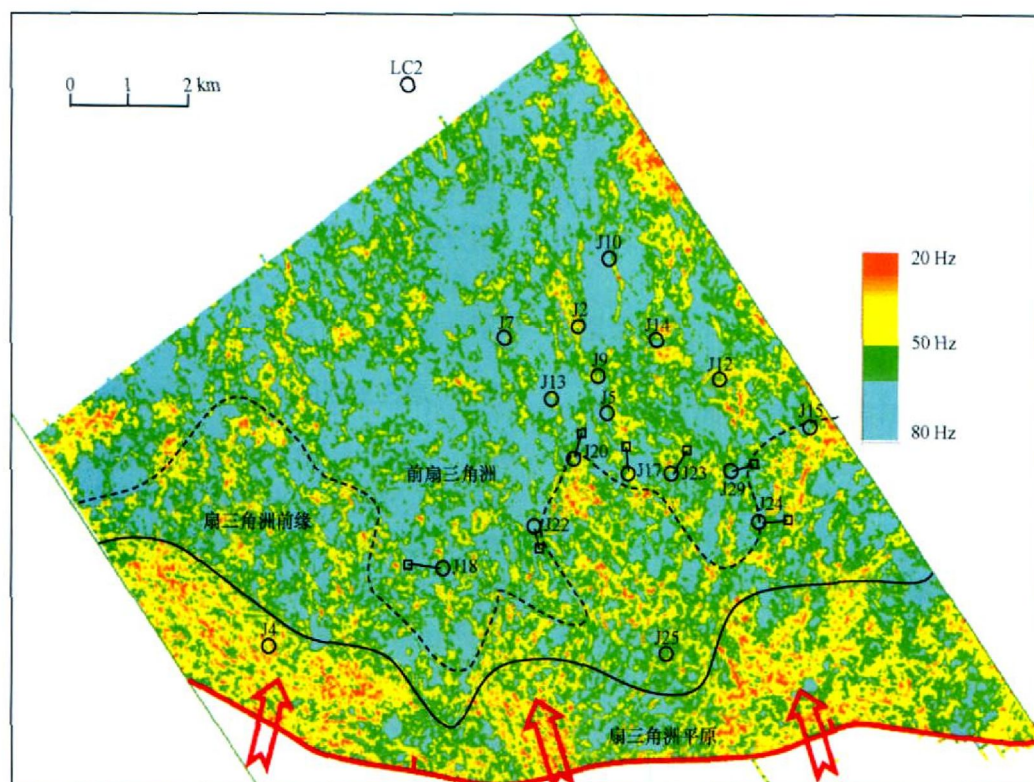


图 5 沙海组调谐体主频分布

Fig. 5 Distribution of the primary frequency for the Shapai Formation

边界断裂向北呈朵叶状展布 (图 3), 延伸远。在南部边界断层处, 地震低频分布连片, 表明此处地震频率低, 砂层较厚, 反映了多物源供给的特点。

九佛堂晚期构造活动趋于稳定, 湖盆地形坡度变缓, 湖泛面进一步扩大, 物源供给不足, 扇三角洲发育范围有所变小, 扇三角洲平原不断向南后退, 导致扇三角洲向北延伸范围变小 (图 4)。在南部边界断层处, 低频区域分成两个较大的区域, 表明地震反射低频杂乱反射区逐渐分成两部分, 反映了九佛堂组晚期两大物源的分布情况。通过对比, 可以看出由九佛堂组早期的多物源逐渐转变为九佛堂组晚期的两大物源供给的变化过程。

沙海期, 随着构造的整体抬升、沉积体系对湖盆的充填, 使得湖水进一步变浅, 由深湖相沉积逐渐演变成浅湖相沉积, 扇三角洲发育范围进一步缩小 (图 5)。物源供给不足, 仅存在多个小物源。

通过以上对沉积相平面的预测可以看出, 由九佛堂组早期到沙海期, 湖盆逐渐变浅, 湖泛面不断扩大, 物源供给量逐步减少, 发育在南部边界断层下降盘的扇三角洲呈现退积特征。

3 结论

通过选择 60~100 ms 的时窗进行地震分频信息处理, 提取地震主频的平面分布, 突出显示反映水下分流河道砂体的频率 (20~50 Hz) 分布, 结合单井沉积相标定, 能更精细刻画扇三角洲的平面展布, 有效地帮助地质研究人员对本区沉积相展布的认识。

研究认为九佛堂组下段、九佛堂组上段、沙海组主要发育扇三角洲沉积, 由南部边界断裂向北呈朵状延伸, 物源来自南部隆起。纵向演化上, 扇三角洲规模逐渐缩小, 呈退积特征, 物源供给逐渐不足, 并且由早期物源供给连片逐渐演化成多、小物源供给特征。

参 考 文 献

- 1 朱庆荣. 分频解释技术在表征储层中的运用 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(3): 104~108
- 2 崔凤林, 管叶君. 时频分析——薄互层结构研究的新途径 [J]. 石油物探, 1992, 31(2): 1~15

(下转第 692 页)

实现较高的采收率, 应加强防止气体突破技术的研究, 具体是:

- 1) 气、水交替驱研究;
- 2) 泡沫驱、聚合物、调剖、微生物等相结合的多种方式与气驱复合驱研究;
- 3) 特殊储层油藏注气研究, 包括裂缝油藏、高含水后期油藏、水敏性油藏、高倾角油藏、气顶油藏等。

6 结论与认识

- 1) 对低渗油藏来讲, 注 CO_2 是一项值得推广的成熟技术。
- 2) 在细管试验中, 增加细管长度、减小直径、提高驱替速度均有利于混相。有必要建立与国际接轨的测试标准。
- 3) 使用相同的原油与注入气, 油藏温度越高, 则混相压力越大。中国与国外相比原油不易混相的原因是地层温度比国外高得多, 粘度也较高。
- 4) 有必要开展降低 MMP 技术的研究, 以提高驱油效率, 推动我国实施低渗油藏注气工程。

参 考 文 献

- 1 王文环. 提高薄互层低渗透砂岩油藏采收率的有效开发技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(5): 660~ 667, 674
- 2 邢正岩. 低渗透砂岩油藏储层非均质地质模型研究 [J]. 石油

实验地质, 2003 25(5): 505~ 507, 512

- 3 何秋轩, 王志伟. 低渗透油田注气开发的探讨 [J]. 油气地质与采收率, 2002 9(6): 38~ 40
- 4 赵卫华, 常剑, 杜燕, 等. 深层低渗难采油藏的注水开发 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 245~ 248
- 5 李士伦, 孙雷, 郭平, 等. 再论我国发展注气提高采收率技术 [J]. 天然气工业, 2006 26(12): 30~ 34
- 6 曹学良, 郭平, 杨学峰, 等. 低渗透油藏注气提高采收率前景分析 [J]. 天然气工业, 2006 26(3): 100~ 102
- 7 Neam Ettin Mungon 2006 worldwide EOR survey [J]. Oil & Gas Journal 2006 104(15): 45~ 57
- 8 郭平, 李士伦, 杜志敏, 等. 低渗透油藏注气提高采收率评价 [J]. 西南石油学院学报, 2002 24(5): 46~ 50
- 9 郭平, 杨学峰, 冉新权. 油藏注气最小混相压力研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005 9~ 13, 17~ 20
- 10 杨丽娟, 陈小凡, 徐海棠. 地层参数对油藏注气开发效果的影响分析 [J]. 西部探矿工程, 2006 18(4): 95~ 97
- 11 Hohn L W, Josenda V A. Discussion of determination and prediction of CO_2 minimum miscibility pressure [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980 32(5): 870~ 871
- 12 李士伦, 张正卿, 冉新权, 等. 注气提高石油采收率技术 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001 24~ 25
- 13 Pius M J Heavy oil survey prepared for US department of energy [J]. Oil & Gas Journal 2006 104(4): 7~ 9
- 14 孙守港, 贾庆升, 宋丹, 等. 低渗透油藏注气提高采收率配套技术 [J]. 油气地质与采收率, 2002 9(2): 28~ 30
- 15 游秀玲, 张玲, 罗云秀. 原油采收率影响因素探讨及油藏综合分类 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(3): 314~ 318
- 16 杨彪, 唐汝众, 栾传振, 等. 国外 CO_2 驱油防止粘性指进和重力超覆工艺 [J]. 断块油气田, 2003 10(2): 64~ 66

(编辑 李 军)

(上接第 686 页)

- 3 李世雄. 小波变换和反演数学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1994 10~ 44
- 4 Partyka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational application of spectral decomposition in reservoir characterization [J]. The Leading Edge 1999 38(6): 353~ 360
- 5 张奎凤, 蓝晖. 短时窗地震信号谱分析方法 [J]. 石油物探, 1995 34(2): 94~ 98
- 6 俞寿朋. 高分辨率地震勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994 184~ 185
- 7 刘传虎. 时频分析方法及在储层预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 1996 31(1): 11~ 20
- 8 宿淑春, 王晓华. 分频波阻抗反演方法及其应用 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2000 24(1): 85~ 88
- 9 赵政璋, 赵贤正, 王英民, 等. 储层地震预测理论与实践 [M].

北京: 科学出版社, 2005 234~ 243

- 10 韩文功, 张建宁, 王金铎. 济阳拗陷隐蔽圈闭识别与精细描述 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 849~ 859
- 11 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 332~ 339
- 12 毛凤鸣, 陈安定, 严元锋, 等. 苏北盆地复杂小断块油气成藏特征及地震识别技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 827~ 840
- 13 王蛟, 姜在兴, 陈世悦, 等. 渤海湾盆地车镇凹陷沙三—沙一段沉积演化与有利砂体预测 [J]. 石油实验地质, 2005 27(4): 371~ 371
- 14 郝志伟, 王楠, 孙明涛, 等. 太平油田馆陶组下段辫状河储层地震反射假象分析 [J]. 油气地质与采收率, 2007 14(1): 56~ 59

(编辑 陈喜禄)