

文章编号: 0253-9985(2011)02-0222-07

陆相断陷盆地陡坡带砂砾岩体期次划分 ——以济阳坳陷车西洼陷北带中浅层为例

宋亮¹ 苏朝光¹ 张莹革¹ 郝志伟^{2,3} 王楠¹

(1. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257000; 2. 中国石化胜利油田分公司西部新区研究中心, 山东东营 257000; 3. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249)

摘要: 针对车西洼陷北带中浅层砂砾岩体期次划分困难的问题, 初步探索出一种在地质和地震资料约束下, 基于测井曲线米氏旋回和小波变换技术的砂砾岩体描述方法。通过对测井曲线进行频谱分析, 认为车西洼陷北带东营组砂砾岩体的沉积期次受米氏旋回的控制, 偏心率 404.0 ka 和地轴倾角 53.6 ka 周期控制着四、五级层序的发育, 是进行砂砾岩体期次划分与对比的基础。因此, 依据米氏旋回和小波变换理论, 在纵向上对车西洼陷北带东营组砂砾岩体进行了精细的划分, 共识别出 8~10 个小的扇体期次。研究表明, 应用米氏旋回和小波变换技术分析高频旋回, 提高了沉积旋回研究的量化水平。其中, 设计的米氏旋回滤波曲线和选取的小波变换系数与高频旋回具有较好的对应关系, 可有效地指导砂砾岩体期次的精细划分。

关键词: 砂砾岩; 高频旋回; 米氏旋回; 小波变换; 陆相断陷盆地; 车西洼陷; 济阳坳陷

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Recognition of sedimentary cycles of sandbodies in steep-slope zones of continental rifted basins

—a case study of middle-shallow horizons in the northern
Chexi Subsag of the Jiyang Depression

Song Liang¹, Su Chaoguang¹, Zhang Yingge¹, Hao Zhiwei^{2,3}, Wang Nan¹

(1. Geophysical Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China;

2. West Frontier Research Center, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China;

3. College of Resource and Information, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to solve the problem of sedimentary cycle recognition of the middle-shallow sandbodies in the northern Chexi Subsag, we proposed a geologic- and seismic-constrained sedimentary cycle description method by using the Milankovitch cycle theory and wavelet transformation with well logging, constrained. Spectrum analysis of well logs shows that sedimentary cycle of sandbodies in Dongying Formation in the northern Chexi Subsag was controlled by the Milankovitch cycle. The fourth- and fifth-order sequences were controlled by the cycle of 404.0 ka eccentricity and 53.6 ka dip of earth's axis, which is the foundation of the division and correlation of sandbody sedimentary cycle. According to the theories of Milankovitch cycle and wavelet transformation, we identified 8-10 small sedimentary fans vertically in the sandbodies of the Dongying Formation in the northern Chexi Subsag. The results show that analyses of high frequency cycles by using the Milankovitch cycle and wavelet transform can improve the quantificational level of sedimentary cycle division. The designed curves of Milankovitch cycle filters and the selected wavelet transformation coefficients correlate well with the high frequency cycles, and thus can be used to effectively recognize sedimentary cycles of sandbodies.

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2011-04-07。

第一作者简介: 宋亮(1983—), 男, 助理工程师, 地震勘探。

Key words: sandbody , high frequency cycle , Milankovitch cycle , wavelet transformation , continental rifted basin , Chexi Subsag , Jiyang Depression

1 问题的提出

车西洼陷为渤海湾盆地济阳坳陷北部车镇凹陷内部的一个次级洼陷,南北夹于无棣——义和庄凸起与埕子口凸起之间,西为庆云凸起,东部经车 3 鼻状构造与大王北洼陷相接。车西洼陷具有明显的陆相断陷盆地的沉积特点,在北部陡坡带的中浅层发育有大量的砂砾岩体沉积,普遍具有埋藏浅、紧临生油洼陷等有利成藏条件,是重要的油气储层。

但该区砂砾岩体非均质性强,成藏复杂,扇体发育期次的不同往往造成含油气性的巨大差异。而常用于地层对比的各类测井曲线幅度异常小,不能很好的反映砂砾岩粒径变化及其沉积旋回性。因此造成期次划分混乱,地层对比困难,严重制约了砂砾岩体油气藏的勘探开发。以往利用地震资料采用包络面和时频分析等手段进行砂砾岩体期次的划分^[1-2],由于受分辨率的限制,无法精细描述砂砾岩体的期次及其内幕旋回。近年来,利用测井曲线小波变换对砂砾岩期次进行精细划分与对比,得到了很好的应用^[3-4]。本次研究以车西洼陷北带中浅层东营组砂砾岩体为例,综合运用米氏旋回理论,结合小波变换技术,进行了砂砾岩体期次划分方法研究。

2 砂砾岩体期次划分技术流程

本文所要探讨的砂砾岩体期次划分的技术流程及关键技术主要包括(图 1):

1) 砂砾岩体低频旋回的确定。选取研究区中基础资料较全的关键井,采用地震时频分析技术,结合岩心、常规测井和成像测井等多种资料,初步确定砂砾岩体的低频旋回。

2) 测井曲线的选择与预处理。本次研究选取了能较好反映砂砾岩体特征、纵向分辨率高的自然伽马曲线;对自然伽马曲线进行归一化和滤波去噪等预处理,以增强曲线的差异幅度,去除背景噪音的干扰。

3) 米氏周期的判断。对预处理后的测井曲线进行频谱分析,确定优势旋回厚度,并与米氏周期比率进行比较,判断砂砾岩体的沉积是否受米氏周期的控制。

4) 砂砾岩体高频旋回的划分。对于符合米氏旋回的井,根据确定的优势旋回厚度,设计相应的低通和带通滤波器,进行单井的高频层序划分;对于不受米氏周期控制的井,则采用小波变换的方法,根据小波图谱和小波变换系数进行单井的高频层序划分。

基于地震资料的时频分析技术已相对成熟,

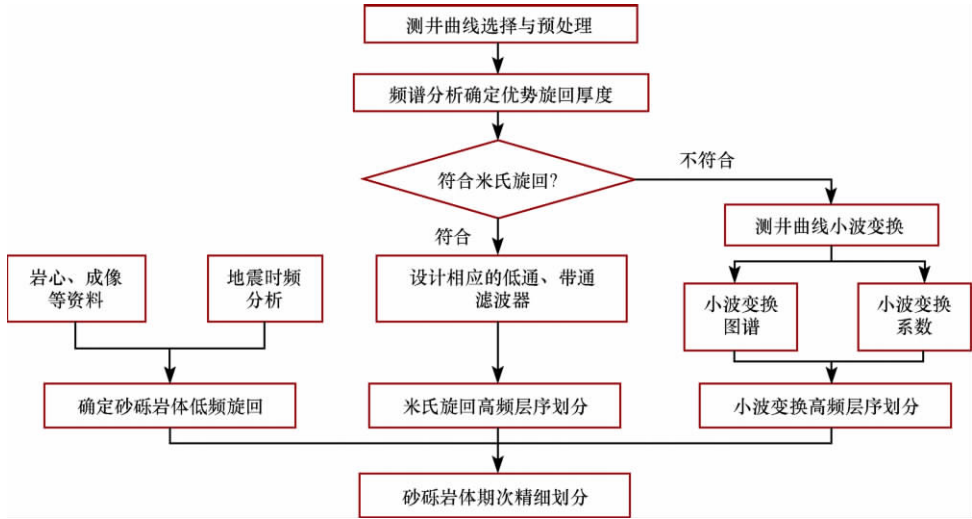


图 1 砂砾岩体期次划分技术流程

Fig. 1 Flow chart of sandbody sedimentary cycle division

在此不再赘述。本文重点探讨基于米氏旋回和小波变换理论的砂砾岩体期次划分方法。

3 应用米氏旋回理论进行砂砾岩体期次划分

3.1 米氏旋回理论的基本原理

米兰科维奇旋回理论认为地球上任一纬度日照量的变化与地球公转轨道三要素(偏心率、地轴倾角和岁差) 的周期变化有关。而周期性的气候变化将在沉积物的结构、构造及沉积层的厚度上反映出来。由于天文周期具有相对的稳定性, 在地层沉积过程中留下的痕迹完全有可能成为一座精确的“沉积物钟”和一种辅助的测龄工具^[5-7]。研究认为, 在过去的500 Ma内, 偏心率旋回没有变化, 地轴倾角和岁差旋回有随着时间的推移而降低的趋势。可近似认为米氏旋回为404.0, 124.0, 95.0, 53.6, 41.0和23.7 ka, 米氏周期比率为404.0 : 124.0 : 95.0 : 53.6 : 41.0 : 23.7。

目前米氏旋回的识别最常用的是米氏周期最佳匹配法。由于米氏旋回在地质历史时期具有相对的稳定性, 其各周期之间的比率关系在一定时期内是稳定的。同级别沉积旋回具有等时间跨度的特性, 如果将地质数据转换到时间域中进行分析(即频谱分析) 后, 若地层所包含的各种旋回厚度与米氏周期比率相等, 则认为符合米氏旋回^[8]。

测井曲线的连续性好, 分辨率高, 能够敏感地反映地层中沉积物的结构、构造、岩性及岩相等周期性变化, 是高频旋回研究的主要资料。通过对测井曲线进行频谱分析可以找到其中的主要频率值, 求出相应的波长, 得出地层中主要的沉积旋回厚度, 进而判断是否符合米氏旋回^[9]。最终, 根据研究精度的不同, 选择不同的米氏周期作为各级层序的划分标尺, 构建滤波器, 对测井曲线进行滤波处理, 获得实际测井曲线中隐藏的米氏旋回, 进行相应级别层序的划分^[10]。

3.2 米氏旋回理论的初步应用

通过对车261井东营组的自然伽马曲线进行频谱分析发现(图2), 该段自然伽马(GR) 曲线的主频有0.007 8, 0.025 4, 0.031 3, 0.058 6和0.078 1 Hz, 将频率倒数转换为相应的波长分别为128.21, 39.37, 31.95, 17.06和12.80 m。由于GR曲线的采样间隔为0.125 m, 因此地层主要旋回厚度为16.03, 4.92, 3.99, 2.13和1.60 m, 周期旋回之比为1.00 : 0.31 : 0.25 : 0.13 : 0.10。将这一比值与地质历史时期米氏旋回各周期比值进行比较发现, 其与404.0 (1.00) : 124 (0.31) : 95 (0.24) : 53.6 (0.13) : 41 ka (0.10) 接近, 符合米氏旋回。

对车西洼陷北带所有探井的东营组GR曲线进行频谱分析发现, 大部分井符合米氏旋回。表1中列出的是与米氏旋回(404.0 : 124.0 : 95.0 : 53.6 : 41.0) ka误差小于10%的井, 发现由偏心率

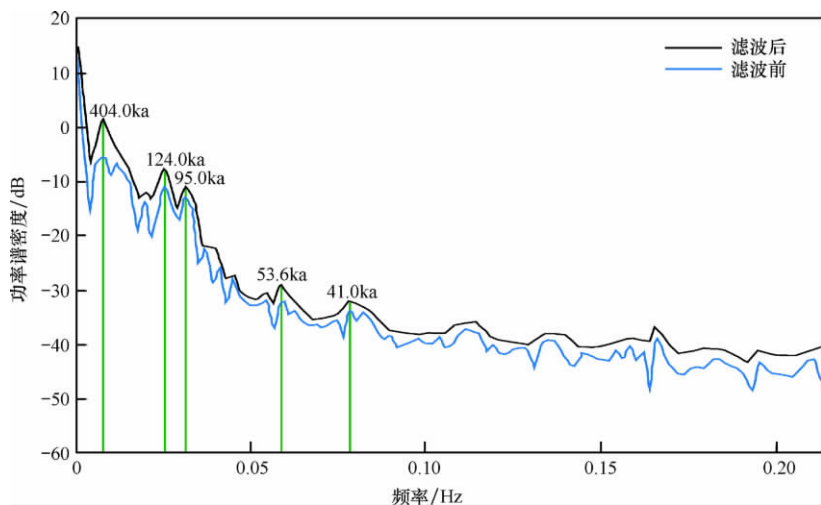


图2 济阳坳陷车西洼陷车261井东营组自然伽马曲线频谱分析

Fig.2 Spectrum analysis on gama log of the Dongying Formation in Well Che-261 of Chexi Subsalt, the Jiyang Depression

404.0 ka 周期引起的地层旋回厚度为 12.79 ~ 64.10 m,平均 35.15 m;124.0 ka 周期引起的地层旋回厚度为 3.99 ~ 18.27 m,平均 9.32 m;95.0 ka 周期引起的地层旋回厚度为 2.85 ~ 16.00m,平均 7.45 m。由地轴倾角53.6 ka引起的地层旋回厚度为 1.56 ~ 8.56 m,平均 4.75 m;41.0 ka 周期引起的地层旋回厚度为 1.60 ~ 6.10 m,平均 3.46 m。

根据以上的频谱分析结果 结合实际地质情况和层序级别的划分标准认为^[3],偏心率 404.0 ka 周期控制着四级层序的发育,地轴倾角 53.6 ka 周期控制着五级层序的发育。分别设计相应的低通和带通滤波器,从测井曲线中提取出受这两个周期控制的四、五级层序变化曲线,从而依据曲线的变

化趋势进行四、五级层序的划分。

以车 26 井的东营组为例。在利用米氏旋回之前,仅能利用时频分析技术划分出两个三级层序,四、五级层序不易识别,且受人为影响较大;在提取了与四、五级层序相关的 GR 测井滤波曲线后,可以精细而客观的进行砂砾岩体期次描述(图 3)。分析认为,低通和带通滤波曲线代表了不同沉积期次砾岩体中泥质发育情况:波峰对应于泥质含量相对较高的砾岩或泥岩隔层发育段,波谷对应于泥质含量相对较低的砾岩或纯砾岩发育段。由此,根据低通滤波曲线,可以划分出 5 个四级层序,对应于 10 个小的扇体期次;在带通滤波曲线上可以进一步划分出 40 个五级层序。

表 1 济阳坳陷车西洼陷北带东营组地层米兰科维奇旋回厚度

Table 1 Milankovitch cycle thickness of the Dongying Formation in the northern Chexi Subsag , the Jiyang Depression

井号	深度 /m	偏心率/ka			地轴倾角/ka	
		404	124	95	53.6	41
		地层旋回厚度/m				
车 26	1 164 ~ 1 415	21.33(1)	6.09(0.29)	4.73(0.22)	2.85(0.13)	2.24(0.11)
车 4	1 236 ~ 1 487	64.10(1)	18.27(0.29)	—	8.56(0.13)	—
车 13	1 193 ~ 1 373	32.05(1)	9.84(0.31)	8.01(0.25)	4.58(0.14)	3.37(0.11)
车 34	1 173 ~ 1 342	42.66(1)	12.79(0.30)	9.12(0.21)	5.56(0.13)	3.99(0.09)
车 261	1 272 ~ 1 765	16.03(1)	4.92(0.30)	3.99(0.25)	2.13(0.13)	1.60(0.10)
车古 26	1 393 ~ 1 671	12.79(1)	3.99(0.31)	2.85(0.22)	1.56(0.12)	—
大 71	1 285 ~ 1 414	64.10(1)	—	16.00(0.25)	8.01(0.13)	6.10(0.10)

注:括号内数据为周期旋回比值;“—”代表该井没有此显著周期。

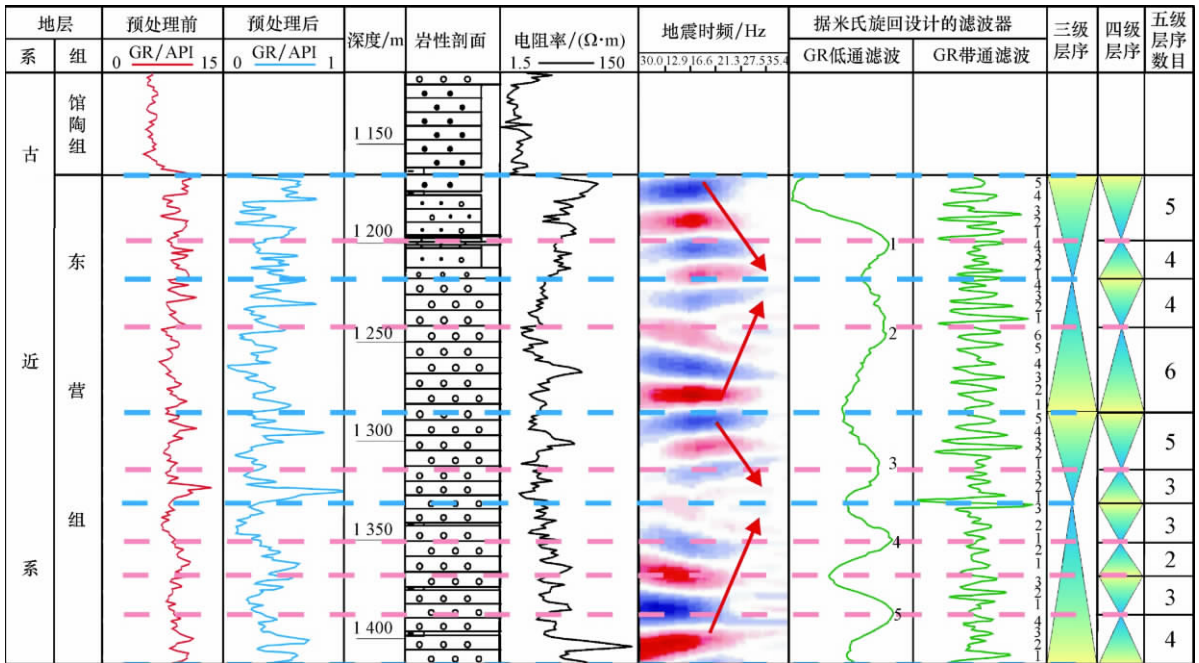


图 3 济阳坳陷车西洼陷车 26 井东营组米氏旋回层序分析

Fig. 3 Milankovitch cycle-based sequence analysis of the Dongying Formation in Well Che-26 of Chexi Subsag , the Jiyang Depression

4 应用小波变换技术进行砂砾岩体期次划分

4.1 小波变换的基本原理

对于车西洼陷北带东营组中米氏旋回不明显的探井,则采用小波变换技术进行砂砾岩体期次的描述。小波变换是傅里叶分析的发展,可在时域和频域两个域内揭示信号的特征。其实质是引入伸缩、平移思想,对不同频率成分自动选取时域和取样步长,从而能够聚焦到信号的任意微小细节,被誉为“数学显微镜”。

小波变换的基本思想是用一族函数去表示或者逼近某一信号或函数。这一簇函数称为小波函数系,它通过将一个基本小波函数 $\psi(t)$ 的自变量 t 进行不同尺度的伸缩和平移构成。连续小波变换就是把小波函数系与待变换的函数 $f(t)$ 作内积,得到具有双参数 a (尺度参数) 和 b (时间位移参数) 的函数 $W_f(a, b)$, 即:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 随尺度参数 a 、时间位移参数 b 的变换对应于不同的频段和不同的时间区间。由于 a, b 值的变化,小波变换对不同频率在时域上的

取样步长是调节性的:在低频时小波变换的时间分辨率较差,而频率分辨率较高;在高频时小波变换的时间分辨率较高,而频率分辨率较低。这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点,由此构成了利用小波变换进行信号分析的基础^[11-14]。

从地质学的角度看,测井曲线可认为是多个不同周期沉积旋回的叠加反映,进行连续小波变换后,得到一系列与尺度和深度相对应的小波变化系数曲线对应于地层中不同沉积厚度的周期旋回。这些周期旋回以尺度的形式展示出来:尺度值大,表示该沉积周期长,对应地层旋回厚度大,称为大尺度旋回,反之称为小尺度旋回。因此,通过观察各种伸缩尺度下小波系数曲线所表现出的周期性振荡特征,可与各级层序界面建立一定的对应关系,作为层序界面划分的依据^[15-18]。

4.2 小波变换的初步应用^[19]

以车 65 井东营组为例,首先结合时频分析技术,划分出 1 个三级层序,识别出 2 个大的扇体期次。通过与测井曲线、岩性剖面的对比,认为小波变换系数 $a=512$ 和 $a=30$ 的曲线分别与四、五级层序对应较好。根据 GR 曲线小波变换图谱,结合小波系数曲线的震荡特性,在 $a=512$ 曲线上划分出 4 个四级层序,识别出 8 个小的扇体期次;在 $a=30$ 曲线上划分出更细微的 43 个五级层序(图 4)。

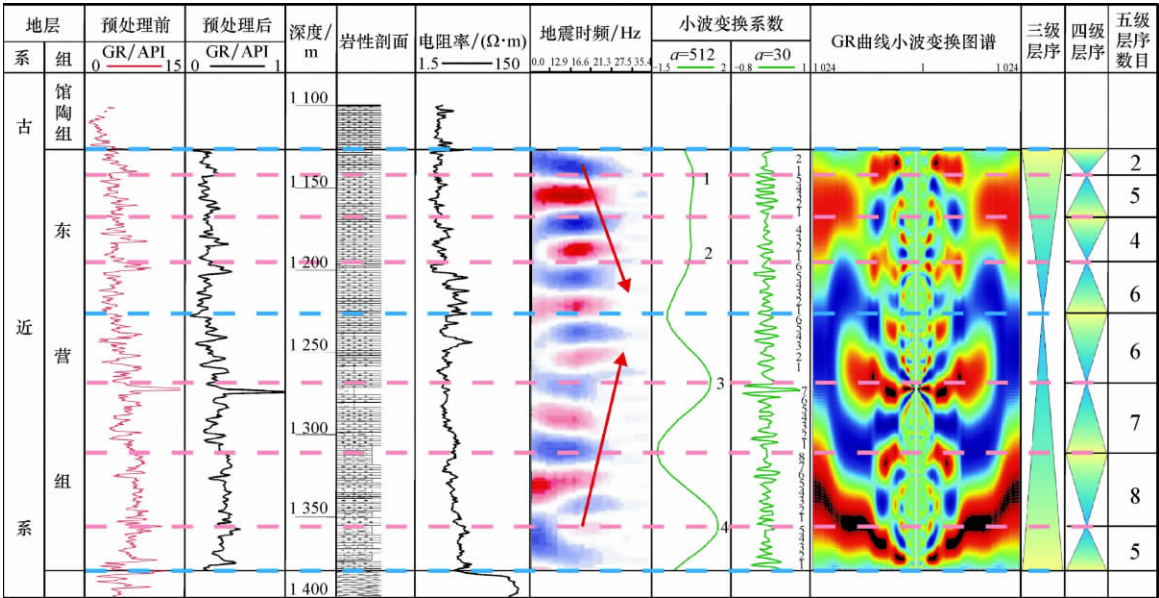


图 4 济阳坳陷车西洼陷车 65 井东营组小波变换层序分析

Fig. 4 Wavelet transformation-based sequence analysis of the Dongying Formation in Well Che-65 of Chexi Subsag, the Jiyang Depression

与单纯利用测井曲线、岩性剖面进行期次描述相比,这一划分结果精细的识别出了四、五级高频旋回,准确的划分了各级的层序界面,较少受人为因素的影响,便于进行井间的期次划分与对比。

5 结论

1) 综合运用地震时频分析、米氏旋回和小波变换等技术方法,初步形成了一套适合陆相断陷盆地砂砾岩体期次划分的技术流程,为砂砾岩体的期次对比和综合地质研究奠定了基础。

2) 依据米氏旋回和小波变换理论进行砂砾岩体期次划分,提高了旋回划分的定量化水平。选取的滤波曲线和小波变换系数曲线与高频旋回具有较好的对应关系,在纵向上对车西洼陷北带东营组砂砾岩体进行了精细的旋回划分,共识别出8~10个小的扇体期次。

参 考 文 献

- [1] 石万忠,李举子,李梦溪等.时-频分析在高分辨率层序地层学中的应用[J].石油与天然气地质,2001,22(3):234-237.
Shi Wanzhong, Li Juzi, Li Mengxi, et al. Application of time-frequency analysis to high resolution sequence stratigraphy [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(3): 234-237.
- [2] 李小梅,俞娟丽.时频分析技术在层序旋回划分中的应用[J].石油与天然气地质,2008,29(6):793-796.
Li Xiaomei, Yu Juanli. Application of time-frequency analysis to division of cyclical sequence [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 793-796.
- [3] 鲜本忠,王永诗.基于小波变换基准面恢复的砂砾岩期次划分与对比[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(6):1-4.
Xian Benzong, Wang Yongshi. Division and correlation of glauconitic sedimentary cycles based on base-level restoration using wavelet transform [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 1-4.
- [4] 郭玉新,隋风贵,林会喜等.时频分析技术划分砂砾岩沉积期次方法探讨——以渤南洼陷北部陡坡带沙四段—沙三段为例[J].油气地质与采收率,2009,16(5):8-10.
Guo Yuxin, Sui Fenggui, Lin Huixi, et al. Discussion on the division and correlation of glauconitic sedimentary period by time-frequency analysis—a case study of Sha4 to Sha3 member of northern abrupt slope zone in Bonan Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 8-10.
- [5] 王起琮.旋回层序地层的控制因素[J].石油与天然气地质,2009,30(5):648-656.
Wang Qicong. Controlling factors of cyclic sequence stratigraphy [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 648-656.
- [6] 张小会,赵重远.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组米兰科维奇旋回的确定[J].石油与天然气地质,2002,23(4):372-375.
Zhang Xiaohui, Zhao Zhongyuan. Definition of milankovitch cycles for yanchang formation of the upper Triassic in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 372-375.
- [7] 金之钧,范国章,刘国臣.一种地层精细定年的新方法[J].地球科学——中国地质大学学报,1999,24(4):380.
Jin Zhijun, Fan Guozhang, Liu Guochen. A new method for accurate dating of strata [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(4): 380.
- [8] 张海峰,张林晔,姚益民等.东营凹陷沙河街组四段滩坝砂米氏旋回层序划分与对比[J].地层学杂志,2008,32(3):279-280.
Zhang Haifeng, Zhang Linye, Yao Yimin, et al. Milankovitch Cycles and sequence division and correlation of the member 4 of the Shahejie formation in the Dongying Depression, Shandong [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(3): 279-280.
- [9] 李凤杰,郑荣才,赵俊兴.鄂尔多斯盆地米兰科维奇旋回在延长组发育的一致性[J].西安石油大学学报(自然科学版),2008,23(5):2-5.
Li Fengjie, Zheng Rongcai, Zhao Junxing. Uniformity of the Milankovitch Cycle developed in the Yanchang Formation in east Gansu with the Milankovitch Cycle developed in other areas in Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2008, 23(5): 2-5.
- [10] 张海峰.以米氏旋回为标尺进行高级别层序地层划分与对比——以准噶尔盆地中I区块为例[J].油气地质与采收率,2006,13(4):18-20.
Zhang Haifeng. High-resolution sequence stratigraphic classification and correlation by using Milankovitch Cycles as rulers-taking the Zhong I block in Junggar Basin as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(4): 18-20.
- [11] 秦建中,王杰,邱楠生等.反演南海相层系热史动态演化的新温标——磷灰石(U-Th)/He年龄和封闭温度[J].石油与天然气地质,2010,31(3):277-287.
Qin Jianzhong, Wang Jie, Qiu Nansheng, et al. New paleo-geothermometers for the inversion of dynamic thermal evolution history of marine sequences in South China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 277-287.
- [12] 陈钢花,余杰,张孝珍.基于小波时频分析的测井层序地层划分方法[J].新疆石油地质,2007,28(3):355.
Chen Ganghua, Yu Jie, Zhang Xiaozhen. Logging sequence stratigraphic division based on wavelet time-frequency analysis [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 355.
- [13] 陈昭佑,王光强.鄂尔多斯盆地大牛地气田山西组砂体组合类型及成因模式[J].石油与天然气地质,2010,31(5):632-639.
Chen Zhaoyou, Wang Guangqiang. Assemblage types and genetic models of the Shanxi sandbodies in Daniudi gasfield, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 632-639.
- [14] 李江涛,余继峰,李增学.基于测井数据小波变换的层序划分[J].煤田地质与勘探,2004,32(2):48-50.
Li Jiangtao, Yu Jifeng, Li Zengxue. The demarcating of stratigraphic sequence based on wavelet transform of well-logging data

- [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(2): 48–50.
- [15] 余继峰, 李增学. 测井数据小波变换及其地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 336–339.
- Yu Jifeng, Li Zengxue. Wavelet transform of logging data and its geological significance [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(3): 336–339.
- [16] 李霞, 范宜仁, 邓少贵. Morlet小波在测井层序地层划分中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(6): 403.
- Li Xia, Fan Yiren, Deng Shaogui. Application of Morlet wavelet in sequence stratigraphic division on well-logging data [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(6): 403.
- [17] 张顺存, 陈丽华, 周新艳, 等. 准噶尔盆地克百断裂下盘二叠系砂砾岩的沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 740–746.
- Zhang Shuncun, Chen Lihua, Zhou Xinyan, et al. Sedimentary model of the Permian sandy conglomerate in the footwall of the Kebai Fault, the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 740–746.
- [18] 赵伟, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 小波分析划分层序单元的地质学理论基础、方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 436–441.
- Zhao Wei, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Geological concept, method and application of sequence unit identification through wavelet analysis [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 436–441.
- [19] 宋亮, 张营革, 苏朝光, 等. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体真构造恢复与内幕旋回划分——以车镇凹陷北带中浅层近岸扇体为例[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(S1): 119.
- Song Liang, Zhang Yingge, Su Chaoguang. True structure recovery and internal cycle division in glutenite in the steep slope zone of faulting-depression basin—an example from the middle-shallow near-shore fans in the northern of Chechen Sag [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(S1): 119.

(编辑 高 岩)

(上接第181页)

- [13] 蒋飞虎, 邓瑞健, 杨静, 等. 中原油气区中生代-古生代地层[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 12–21.
- [14] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 未熟-低熟油的同位素组成特征及判别标志[J]. 科学通报, 2001, 46(10): 867–872.
- Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui, et al. Isotopic composition characteristics and identification marks of unmaturing and low mature oil [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(10): 867–872.
- [15] 朱光有, 金强, 戴金星, 等. 东营凹陷沙四中段盐湖相烃源岩研究[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 257–266.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Dai Jinxing, et al. Investigation on the salt lake source rocks for Middle Shashi Column of Dongying Depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(2): 257–266.
- [16] 史继扬, 汪本善. 苏北盆地生油岩中甾、萜的地球化学特征和我国东部低成熟的生油岩与原油[J]. 地球化学, 1985, 14(1): 80–88.
- Shi Jiyang, Wang Benshan. Geochemical features of sterane and terpane in source rocks from the Subei Basin and immature crude oils and source rocks in the eastern part of China [J]. Geochimica, 1985, 14(1): 80–88.
- [17] 赵广珍, 张家政, 张源智, 等. 白音查干凹陷西洼低熟油特征及成藏规律[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 4–7.
- Zhao Guangzhen, Zhang Jiazheng, Zhang Yuanzhi, et al. Characteristics and pool forming regularity of immature oil in western Baiyinchagan depression, Erlan basin. [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 4–7.

(编辑 李 军)

(上接第221页)

- [13] 刘志文. 乌尔逊凹陷油气运移方向研究[J]. 断块油气田, 2008, 15(5): 31–33.
- Liu Zhiwen. Migration direction of oil and gas in Wuersun depression [J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2008, 15(5): 31–33.
- [14] 秦雁群, 邓宏文, 丁寒生. 乌尔逊-贝尔凹陷构造调节带特征、成因机制及其地质意义[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 872–879.
- Qin Yanqun, Deng Hongwen, Ding Hansheng. Characteristic, geologic meaning and forming mechanisms of the structural accommodation zones in Wuersun-Beier depression [J]. Geoscience, 2009, 23(5): 872–879.
- [15] Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322–350.
- [16] 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析[J]. 古地理学报, 2009, 11(5): 471–480.
- Deng Hongwen. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 471–480.

(编辑 董 立)