

文章编号: 0253-2697(2008)06-0865-05

基于小波振幅谱和复小波相位谱的高分辨率层序划分

王志坤^{1,2} 钟建华¹ 艾合买提江·阿布都热合曼¹ 郑希民³

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061; 2. 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院 河北唐山 063004;
3. 中国石油勘探开发研究院西北分院 甘肃兰州 730020)

摘要: 为了从多分辨率的角度充分挖掘测井信号的内部信息,应用小波变换多尺度分解技术,对测井信号进行了复小波连续变换和连续小波分析。利用小波振幅谱能谱带尺度偏移特征、复小波相位谱相位转换线和相位零线特征识别出了层序级次、旋回叠加模式、层序界面和湖泛面。对于不同类型的层序界面和湖泛面,其小波振幅谱和复小波相位谱的响应特征不同。以鄂尔多斯盆地10井为例,联合应用振幅谱和相位谱进行了层序划分。与传统方法相比,该方法能有效地利用测井信号内部结构信息准确地识别层序界面,为层序划分提供一定依据。

关键词: 高分辨率层序划分;层序界面;振幅谱;相位谱;小波分析

中图分类号: TE111.3 **文献标识码:** A

Division of high-resolution sequence based on wavelet amplitude spectrum and complex wavelet phase spectrum

WANG Zhikun^{1,2} ZHONG Jianhua¹ Ahmatjan·Abdurahman¹ ZHEN G Ximin³

(1. Faculty of Geor Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China;
3. Northwest Branch, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In order to detect the inner information of well logging signals with the view of multi-resolutions adequately, the multi-scale decomposition technique was used to analyze the complex wavelet and continuous wavelet of well logging. The wavelet analyses in amplitude spectrum and phase spectrum are valid in detecting the sequences level, cyclic deposition patterns and flood surface. The different sequence boundary and flood surface have the different response in the amplitude spectrum and phase spectrum. The amplitude spectrum and the phase spectrum were applied to sequence analysis in Well Chi-10 of Ordos Basin. The method was effective for analyzing the sedimentary cycle system and could detect the sequence boundaries accurately using the information of internal structure of logging data.

Key words: high-resolution sequence division; sequence boundary; amplitude spectrum; phase spectrum; wavelet analysis

近年来,高分辨率层序地层学及相关的地震和测井技术在油气勘探应用中取得了重大进展,特别是在地层和岩性油气藏的勘探中越来越显示其有效性^[1-6]。基准面旋回的识别和对比是层序地层学的关键问题^[7],通常是应用地震、岩心和测井资料来识别基准面旋回。由于地震资料分辨率以及岩心取心段的限制,使两者只能对特定级别的基准面旋回进行识别。而测井曲线具有高分辨率、高连续性的优点,同时也是油区最丰富、最容易获得的地质资料,其中蕴含着丰富的地质信息,是了解地质过程的最好工具。应用测井曲线进行基准面旋回划分时,不同研究者的划分方案具有很大差异,其根本原因是测井反映的沉积序列实际上

是各地质周期沉积响应的叠加,从测井曲线上人工判读各隐含周期必然带来主观随意性。而小波变换的多分辨率分析方法可以解决地质过程的多时间多尺度问题,小波变换独有的多尺度分解技术是测井信号分析的有力工具^[8]。笔者应用连续小波变换将一维测井信息转换为二维深度—尺度信息,并通过振幅谱和相位谱的分析进行层序划分。

1 小波变换原理

小波是一种特殊的、长度有限、平均值为0的波形。小波函数的确切定义为:设 (t) 为一平方可积函数,即 $(t) \in L^2(\mathbf{R})$,若其傅立叶变换 (ω) 满足以下

基金项目:中国石油天然气集团公司创新基金(2002F70108)资助。

作者简介:王志坤,男,1977年9月生,2008年获中国石油大学(华东)博士学位,现在中国石油冀东油田公司勘探开发研究院工作,主要从事沉积储层研究。E-mail:wangzkylh@qq.com

条件:

$$C = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{f}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 是 $f(t)$ 的傅立叶频谱; ω 为频率, MHz; \mathbf{R} 代表实数集; C 代表复数集。

则 $f(t)$ 就是一个基本小波或小波母函数, 式(1)即为小波函数的可容许条件。

由小波函数的定义可知, 其有两个特点: “小”, 即在时域和频域均具有紧支集或近似紧支集。虽然从原则上讲, 任何满足容许条件的 $L^2(\mathbf{R})$ 空间的函数都可作为小波母函数, 但一般常选取紧支集或近似紧支集(具有时域的局部性)且具有正则性(具有频域的局部性)的实数或复数函数作为小波母函数, 这样的小波母函数在时、频域都会具有较好的局部特性。正负交替的“波动性”, 即直流分量为零。傅立叶分析所用的正弦波在时间上没有限制(从负无穷到正无穷), 但小波倾向于不规则与不对称。傅立叶分析是将信号分解成一系列不同频率的正弦波的叠加, 同样小波分析是将信号分解成一系列小波函数的叠加, 且这些小波函数都是由一个母小波函数经过平移与尺度伸缩得来的。

连续小波变换是将任意 $L^2(\mathbf{R})$ 空间的函数 $f(t)$ 在小波基下展开, 其表达式为

$$WT_f(a, t) = [f(t), a, (t)] = \int_{\mathbf{R}} f(t) \times \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-t_0}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为时间序列; a 为尺度因子; t_0 为平移因子; $WT_f(a, t)$ 为小波变换系数。

对于实信号 $x(t)$, 采用复小波基函数进行连续小波分析, 得 $CWT_x(a, t)$ 。其实部为 $\text{Re}(a, t)$, 虚部为 $\text{Im}(a, t)$, 则相位为

$$\phi(a, t) = \arctan \frac{\text{Im}(a, t)}{\text{Re}(a, t)}$$

由以上定义可以看出, 小波变换和傅立叶变换一样, 也是一种积分变换。但其不同之处在于: 小波基具有尺度 a 和平移 t_0 两个参数, 所以函数一经小波变换, 就意味着将一个时间函数投影到二维的时间-尺度相平面上, 这样有利于剖析时间序列内部精细结构, 以分析其周期成分和突变特征。

2 小波振幅谱及复小波相位谱的层序识别方法

沉积物的不同韵律特征形成了不同级次的地层和旋回。测井资料是地层物理性质的综合反映, 由旋回

导致的物理性质变化在测井资料时间域特征上反映较为明显。常规测井信号是在深度域按等间距采样而获得的离散信号, 根据信号分析理论可将其视为非平稳离散深度非周期信号。将测井信号深度域与时间域等价, 则测井信号的周期响应反映了地层厚度的变化。因此, 测井曲线小波变换后, 存在尺度(周期)-层序旋回的内在对应关系。

2.1 利用连续复小波相位谱识别层序级次及湖泛面

用 Gaussian 小波对 GR 曲线进行复小波连续变换得到相位谱。相位谱有 2 个重要特性: 识别周期级次, 即通过相位谱不同尺度上相位系数的周期变化准确判断信号的周期成分。能对各个周期成分给予准确的时间定位, 特别是能准确定位每个周期的最大值。基于以上特点, 在碎屑岩中, 利用 GR 曲线或 SP 曲线的连续复小波相位谱特征, 能有效地划分层序级次和确定湖泛面位置。

为了说明复小波相位谱的层序识别方法, 构筑了具有 2 个级次周期的 $\sin(2t) + \cos(2t)$ 模型曲线(图 1)。该曲线可以被看作是 GR 或 SP 曲线。对构

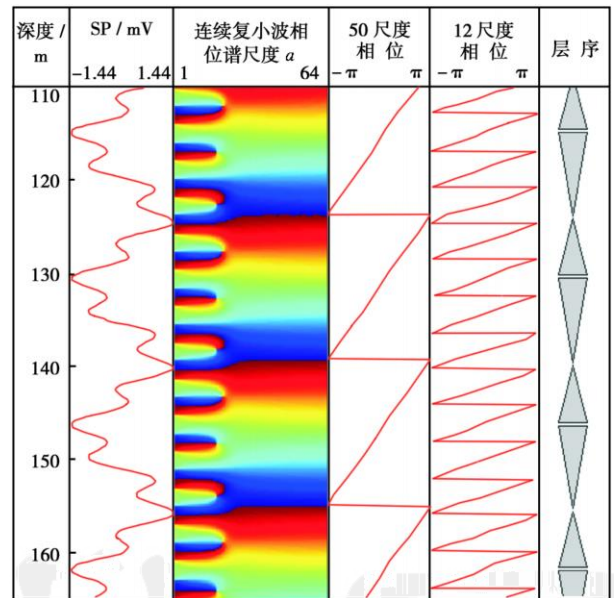


图 1 利用连续复小波相位谱识别层序周期和湖泛面
Fig. 1 Identification of sequence cycle and flood surface based on phase spectrum of complex wavelet

筑的信号用 Gaussian 小波进行 1~64 尺度复小波连续分析可得到相位谱, 相位谱清晰显示了两个级次的周期。尺度 1~18 显示了信号的高频周期, 包括 14 个短周期; 尺度 18~20 为 2 个级次周期的叠加, 也就是混频现象; 尺度 20~64 显示了信号的低频周期, 包括 3 个长周期。每个周期的最大值处(湖泛面)对应相位 $\pi/2$ 到的转换点, 最小值(层序界面)对应相位零点。

2.2 利用连续小波振幅谱识别层序界面和旋回叠加模式

测井信号属于非平稳信号,在非平稳信号时频分析中,Morlet小波具有独特的优势。它的频率分辨率较高,频率混叠程度较弱。应用Morlet小波对测井信号进行连续小波分析,得到相应的振幅谱图(图2)。该振幅谱图中红色表示能量高,小波系数绝对值大;蓝色表示能量低,小波系数的绝对值相对较小。在碎屑岩地层中,能量的交替变化代表砂泥互层沉积。振幅谱能量的偏移方向反映了砂泥薄互层厚度的变化规

律,振幅谱上能谱带的尺度偏移反映了由净沉积速率的逐渐增加或减少引起的旋回逐渐增厚或减薄。图2中,从下向上能谱带由小尺度向大尺度偏移,说明沉积速率增加,旋回厚度增加,砂泥比向上变大,反映了进积式旋回的岩性变化特点[图2(a)];从下向上能谱带尺度不变,说明各旋回厚度相同,砂泥比相同,反映了加积式旋回的岩性变化特点[图2(b)];从下向上能谱带由大尺度向小尺度偏移,说明沉积速率减小,旋回厚度减小,砂泥比向上变小,反映了退积式旋回的岩性变化特点[图2(c)]。作为层序界面的不整合面处能谱

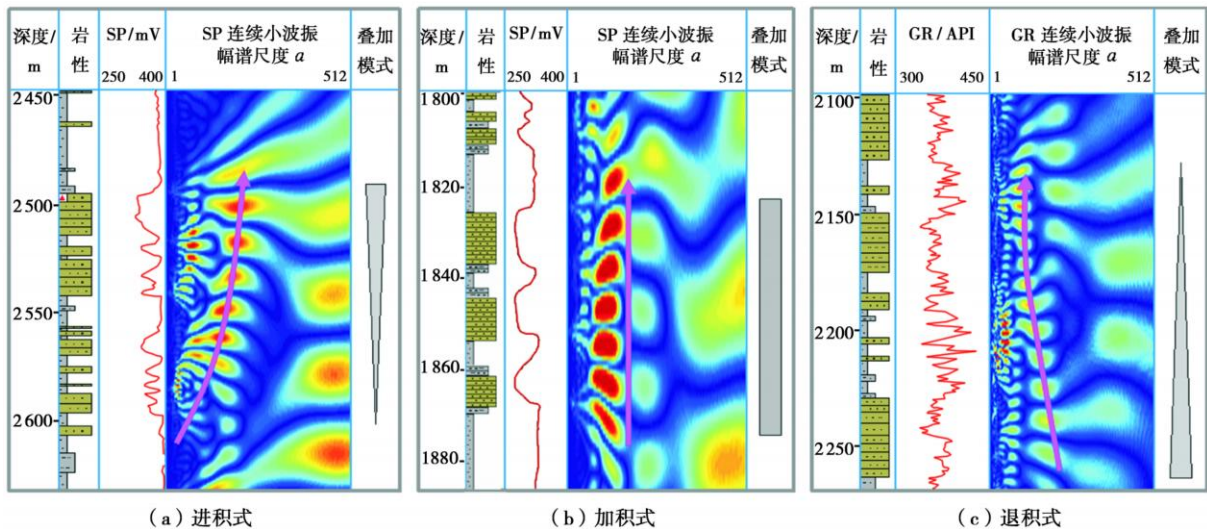


图2 旋回叠加模式的连续小波振幅谱识别

Fig. 2 Identification of cyclic deposition patterns based on continuous amplitude spectrum of wavelet

带尺度发生突变,相转换面处能谱带尺度变化为“小—大—小”,因此可以利用能谱带尺度的变化规律和旋回的叠加模式来识别层序界面。

3 样本选取及实例分析

应用测井曲线划分层序有2个重要前提:垂向砂泥比的变化至少能够代表三角洲的进退或者湖泊的扩张、收缩;地层横向稳定,容易追索及对比。陆相地层中,大型坳陷盆地层序的稳定性、可比性最好,尤其是三角洲广泛发育的大型湖盆,其垂向充填序列伴随基准面的波动呈现规律性的周期变化,并且这种变化能通过砂泥比反映出来。

根据上述条件,选择鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为研究样本。在延长组形成时期,盆地经历了形成、发展至消亡的全过程,形成了一个完整的二级层序;盆地西部发育数个辫状河—三角洲—湖泊沉积体系,地层岩性主要为灰色、灰绿色砂岩、粉砂岩和灰色、黑灰色泥质岩^[9-10],其区域对比标志层有李家畔页岩、张家滩油页岩、长4+5泥质岩和瓦窑堡煤层。总之,鄂尔

多斯盆地延长组具有三角洲发育、标志层明显、地层横向分布稳定、相带比较清晰、后期改造微弱的特点,是本方法理想的研究对象。在盆地西部三角洲平原发育区、中部三角洲前缘发育区以及湖泊沉积中心等部位,分别选取油气探井,建立了岩性、测井单井分析剖面。如在位于三角洲前缘的池10井选取GR和SP曲线,采用Morlet小波技术进行了连续小波分析,得到了1 2 1200尺度连续小波振幅谱图;选取GR曲线,采用Gaussian小波技术进行了复小波连续变换,得到了连续复小波相位谱图(图3)。

由连续小波振幅谱能谱带偏移特征和连续复小波相位谱转换线特征识别出两种湖泛面和两种层序界面。两种湖泛面包括突变式湖泛面(FS3)和渐变式湖泛面(FS2、FS4、FS5)。突变式湖泛面特征为基准面变浅后又突然变深,相位谱上表现为相位从-到(蓝—红)的转换,相位转换点不同尺度上位置不同,形成弯曲的相位转换线;振幅谱上表现为能谱带由小—大尺度偏移的进积式旋回突变为更高频的小—大尺度偏移的进积式旋回。渐变式湖泛面特征为基准面缓慢变深

后再变浅,相位谱相位转换点不同尺度上位置相同,形成平直的相位转换线;振幅谱表现为能谱带由大一小尺度偏移的退积式旋回向小一大尺度偏移的进积式旋回的转换点。两种层序界面包括不整合面(SB5、SB7)和相转换面(SB2、SB4、SB6)。层序界面在相位谱上为相位零点(图1),不整合面的相位零点在不同尺度上位置不同,形成弯曲的相位零线,振幅谱能谱带在界面上下尺度发生突变,显示沉积环境和沉积速率的突变;相转换面的相位零点在各尺度上位置相同,形成平直

的相位零线,振幅谱能谱带为小一大尺度进积式旋回与大小尺度退积式旋回的转换处。

通过相位谱和振幅谱分析,在长9—长1段识别出4个湖泛面和8个不同叠加模式的旋回,据此将延长组划分为6个三级层序SQ1—SQ6(图3)。由表1可以看出,对于长10—长4+5段,笔者与谢正温等^[11]、李凤杰等^[12]划分结果一致,而长3—长1段,层序界面与杨雷等^[13]的划分方案一致。这表明小波分析自动判别的基准面旋回与Fischer图解法、古水深

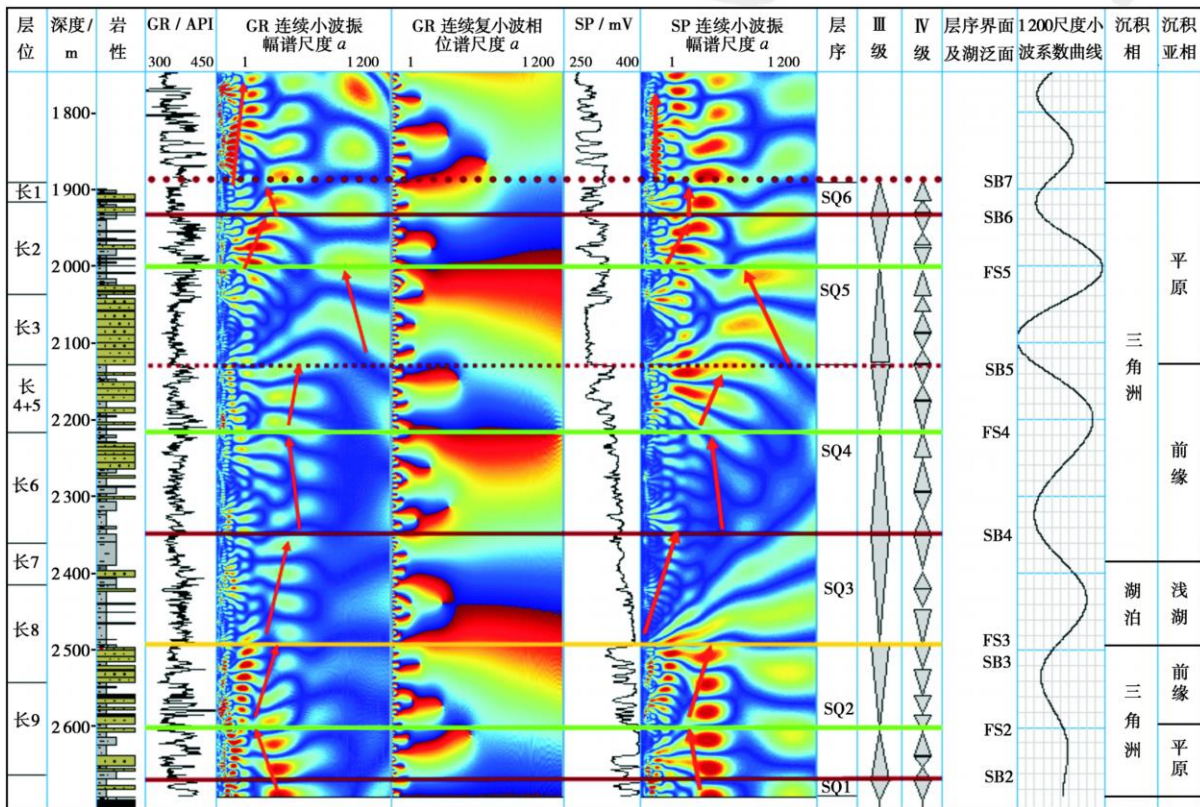


图3 利用连续小波振幅谱和连续复小波相位谱对池10井层序划分结果

Fig.3 Detection of sequence boundaries based on continuous amplitude and phase spectrums of wavelet in Well Chi-10

表1 延长组层序划分方案对比

Table 1 Comparison of scheme for sequence division of Yanchang Group

| 系组 | 油组 | 杨雷等 ^[13] | 谢正温等 ^[11] | 李凤杰等 ^[12] | 笔者 | |
|-----|----|---------------------|----------------------|----------------------|-----|-----|
| 三叠系 | 延 | 长1 | SQ4 | SQ6 | SQ6 | |
| | | 长2 | | SQ5 | SQ5 | |
| | | 长3 | SQ3 | SQ5 | SQ5 | |
| | 叠 | 长4+5 | SQ2 | SQ4 | SQ4 | SQ4 |
| | | 长6 | | | | |
| | | 长7 | SQ1 | SQ3 | SQ3 | SQ3 |
| | | 长8 | | | | |
| | 系组 | 长9 | | SQ2 | SQ2 | SQ2 |
| | | 长10 | | SQ1 | SQ1 | SQ1 |

分析法、岩性(相)+电性分析法的研究结果相同,并且小波分析的特点是不需要人工干预,排除了主观随意性,因此更加客观、准确、高效。

4 结语

应用 Gaussian 小波的相位谱信息可以识别周级别、层序界面和湖泛面。层序界面位于相位谱零点,湖泛面位于相位谱相位转换点。利用 Morlet 连续小波振幅谱特征可以进行旋回类型、层序界面和湖泛面的识别。对于不同类型的湖泛面和层序界面,其振幅谱和相位谱具有显著不同的响应特征。研究表明,联合应用振幅谱和相位谱可以进行层序划分,与传统

方法相比,该方法能有效利用测井信号内部结构信息准确识别层序界面,可为层序划分提供一定依据。

参 考 文 献

- [1] 李阳,蔡进功,刘建民. 东营凹陷下第三系高分辨率层序地层研究[J]. 沉积学报,2002,20(2):210-216.
Li Yang, Cai Jingong, Liu Jianmin. High-resolution sequence stratigraphy of Paleogene in Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2):210-216.
- [2] 李思田,潘元林,陆永潮,等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术—高精度地震探测基础上的层序地层学研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2002,27(5):592-598.
Li Sitian, Pan Yuanlin, Lu Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5):592-598.
- [3] 贾承造,赵文智,邹才能,等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):3-9.
Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Two key technologies about exploration of stratigraphic/lithological reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3):3-9.
- [4] 王居峰,蔡希源,邓宏文. 东营凹陷中央洼陷带沙三段高分辨率层序地层与岩性圈闭特征[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(4):7-11.
Wang Jufeng, Cai Xiyuan, Deng Hongwen. High-resolution sequence stratigraphy and lithologic trap characteristics of Sha-3 Member in the central sag of Dongying Depression [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2004, 28(4):7-11.
- [5] 杨会东,王书平,马玉天,等. 高精度层序地层技术在松辽盆地南部隐蔽油藏勘探中的应用[J]. 石油学报,2005,26(3):40-43.
Yang Huidong, Wang Shuping, Ma Yutian, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy to exploration of subtle reservoir in the southern Songliao Basin. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3):40-43.
- [6] 项华,徐长贵. 渤海海域古近系隐蔽油气藏层序地层学特征[J]. 石油学报,2006,27(2):11-15.
Xiang Hua, Xu Changgui. Sequence stratigraphic characteristics of subtle oil-gas pool in the Palaeogene of Bohai Sea area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2):11-15.
- [7] 袁新涛,沈平平. 高分辨率层序框架内小层综合对比方法[J]. 石油学报,2007,28(6):87-91.
Yuan Xintao, Shen Pingping. Continental strata correlation of high-resolution sequence in reservoir development phase [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6):87-91.
- [8] 郑希民,郭彦如,刘化清,等. 应用自然伽玛测井曲线小波分析划分陆相拗陷盆地三级层序的方法:以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 天然气地球科学,2006,17(5):672-676.
Zheng Ximin, Guo Yanru, Liu Huaqing, et al. The method of division third-degree succession of strata by gamma ray logging wavelet analysis in stationary continental facies depression basin: Taking Yanchang Formation of Ordos Basin as an example [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5):672-676.
- [9] 王多云,郑希民,李凤杰,等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学,2003,14(2):87-91.
Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, et al. Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2):87-91.
- [10] 郑希民,宋广寿,王多云,等. 陕甘宁盆地陇东地区长8油组厚层非均质砂体的沉积学解剖[J]. 沉积学报,2003,21(2):272-277.
Zheng Ximin, Song Guangshou, Wang Duoyun, et al. Sedimentary anatomy of thick anisotropic sandstones for Chang 8 oil formation in Longdong area, Shaan- Gan- Ning Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2):272-277.
- [11] 谢正温,谢渊,王剑,等. 富县地区延长组层序地层对储层的控制[J]. 矿物岩石,2004,24(2):95-103.
Xie Zhengwen, Xie Yuan, Wang Jian, et al. Control of sequence stratigraphy on the reservoir of Yanchang Formation in Fuxian area, northern Shaanxi [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(2):95-103.
- [12] 李凤杰,王多云,张庆龙,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析[J]. 沉积学报,2006,24(4):549-554.
Li Fengjie, Wang Duoyun, Zhang Qinglong, et al. Sedimentary facies characteristic and sequence stratigraphy analysis of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4):549-554.
- [13] 杨雷,梅志超,熊伟. 陕北地区延长组层序地层划分与含油气性[J]. 古地理学报,2001,3(3):83-88.
Yang Lei, Mei Zhichao, Xiong Wei. Stratigraphic sequence and petroliferous characters of Yanchang Group in north Shaanxi Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(3):83-88.

(收稿日期 2008-01-11 改回日期 2008-03-21 编辑 王 秀)