

综合预测误差滤波分析方法在地层划分及等时对比中的应用

刘洛夫^{1,2},徐敬领^{3,4},高 鹏⁵,邹长春^{3,4},王远征⁶,徐新宇⁷

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249;
3. 中国地质大学 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室,北京 100083; 4. 中国地质大学 地球物理与信息技术院,北京 100083;
5. 中国石油 大庆油田有限责任公司 第二采油厂地质大队,黑龙江 大庆 163257;
6. 中国石油 冀东油田公司 陆上油田作业区工艺研究所,河北 唐海 063200; 7. 中国石油 海外勘探开发分公司,北京 100034)

摘要:针对目前地层划分、对比存在人为性、多解性等问题,首先仔细分析了野外露头与岩心的沉积序列特点,研究了地层的叠置序列与旋回结构;进而建立了相应的地质模型,通过地质模型把地层的旋回结构转化成数值模拟信号;最后根据信号特征,提出了综合预测误差滤波分析方法,并研究出该方法的原理、步骤、功能。在此基础上,利用该方法对模拟信号进行处理分析,提取出反映地层叠置及旋回结构的频谱趋势线,并搞清频率趋势线的地质意义乃间接反映了当时的沉积环境及基准面变化过程。由此,可以找出反映同一等时地层界面的拐点及变化趋势,根据拐点及变化趋势完成了地层的等时对比。这为地层精确划分及真正意义上的等时对比奠定了基础。通过对实际测井数据的处理,验证了该方法的有效性。

关键词:测井数据;滤波分析;等时对比;地层划分

中图分类号:P631

文献标识码:A

Application of comprehensive prediction error filter analysis to stratigraphic division and isochronous correlation

Liu Luofu^{1,2}, Xu Jingling^{3,4}, Gao Peng⁵, Zou Changchun^{3,4}, Wang Yuanzheng⁶, Xu Xinyu⁷

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory of Geo-detection, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. No. 2 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163257, China; 6. Technology Research Institute of Onshore Oilfield, PetroChina Jidong Oilfield Company, PetroChina Tanghai, Hebei 063200, China; 7. PetroChina International Exploration & Development Company, Beijing 100034, China)

Abstract: Aiming at solving the problems such as difficulty in stratigraphic division, subjectivity and ambiguity of stratigraphic correlation, this paper studied the superimposition sequence and cycle structures of strata and established corresponding geological models based on the analysis of the sedimentary sequences on outcrops and cores. We converted the structures of sedimentary cycles into signals of numerical simulation via the geological model. According to the features of the signals, we proposed the comprehensive prediction error filter method and presented its principle, steps and functions. Frequency trend lines that can reflect the stratigraphic superimposition and structures of sedimentary cycles were extracted through processing of the simulation signals, and were linked indirectly with the changes of the sedimentary environment and base level. Therefore, we can find the inflection points and trends that reflect the same isochronous stratigraphic surfaces. According to the inflection points and trends, we can perform isochronous stratigraphic comparison, providing a solid basis for precise stratigraphic division and isochronous comparison. Processing of real logging data shows that this method is valid.

Key words: logging data, filter analysis, isochronous correlation, stratigraphic division

层序地层学以其理论上的系统性、综合性,尤其是 应用上的可预测性,逐渐得到了地质学界的重视,并成

收稿日期:2013-03-05;修订日期:2013-07-05。

第一作者简介:刘洛夫(1958—),男,教授,石油地质。E-mail:liulv@cup.edu.cn。

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201311107);中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0103);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2652011282)。

为地质研究的热点^[1-5]。然而,目前国内外的层序地层分析多采用手工作业及定性研究,在划分的精度、量化的科学性及划分的效率等方面仍有待进一步提高^[6-14]。鉴于层序地层学已成为岩性油气藏勘探的核心技术^[15-16],我国应该特别加强层序地层研究中对高、新技术的应用和数字层序地层的研究^[17-18]。

目前,为了提高地层划分的精确度,前人对层序地层研究采用了许多分析方法,如自相关函数功率谱方法、周期图方法、最大熵谱方法、最大似然方法等。这些分析方法推进了层序地层学研究向定量化、数字化方向发展,但效果不是很明显。在此基础上,作者提出了综合预测误差滤波分析方法。通过地质模型及实例验证了该方法的有效性和精确性。

1 理论基础

要实现地层的精细划分及对比,达到定量划分的效果,一般都基于具有高分辨率的测井资料,研究其在地层划分及对比中的特性。地层划分及等时对比最主要的是找出地层的层序边界和级别,所以首先要搞清沉积基准面的变化和地层的叠置序列,为地层划分及对比服务。其基本思路是:1)从测井资料中识别并划分出不同周期的沉积旋回;2)每一个沉积旋回代表着一个沉积基准面变化周期,这些小的旋回周期在高级次的升降变化周期中处于一个特定的位置,我们需要确定出它们应处的位置,并按规律组合成一条沉积基准面升降变化曲线;3)这条沉积基准面变化曲线在层序划分、环境判断、盆地演化中应用广泛^[19]。关键是如何提取出这条反映基准面旋回和反映地层叠置周期状况的趋势线。

根据对野外露头剖面的观测,地层都是层层叠置序列。假如设计一个地质模型,下面一层是粒度较粗的砂岩层,上面是细粒泥岩层,再上面又是粗粒砂岩层,到细粒泥岩层,这样逐层叠置,如图1左侧地质模型。根据地层叠置序列特征,我们猜想,假如我们用一种频率趋势或其它一种直观的形式把地下不同岩性地层的叠置序列反映出来,就能取得一大进步,图1右侧折线变化及拐点正好跟地层及地层界面是一一对应。所以,需要搞清两个问题:1)这条趋势线(折线)是怎么来的;2)这条曲线及拐点的地质意义是什么。针对以上两个问题,作者寻找了求取趋势线的算法,以及趋势线跟地层对比所反映的地质问题。

根据以上假设和目标,作者制定了一个技术流程(图2),并在最大熵谱分析的基础上,提出综合预测误差滤波分析方法。最大熵谱分析(Maximum Entropy Spectral Analysis,简称MESA)是按信息熵最大准则外

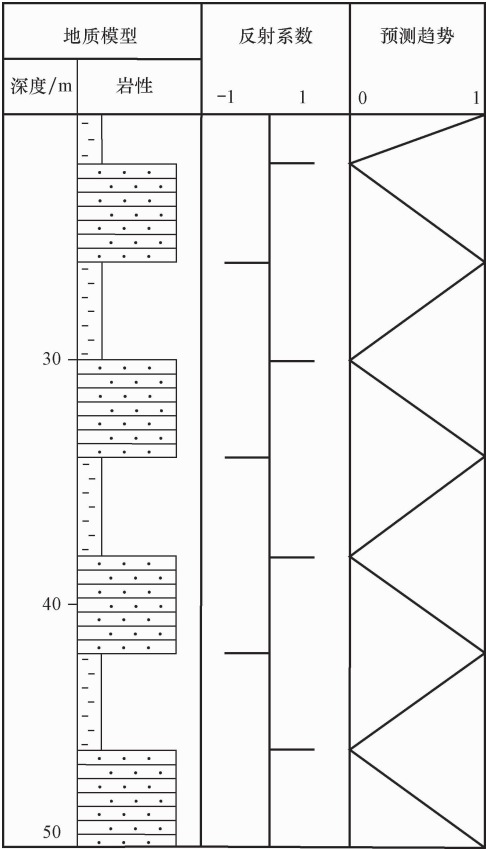


图1 综合预测误差滤波分析方法的地质模型及算法思想
Fig.1 Geological model and algorithm of integral prediction error filter analysis

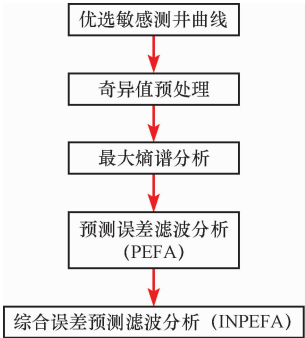


图2 综合预测误差滤波分析方法的技术思路
Fig.2 Technical flow of integral prediction error filter analysis

推得到自相关函数的方法,特别适用于数据规则性差和噪声较多的情况,可提高频谱估计的分辨率。最大熵谱分析与其它谱分析方法(如傅里叶谱和周期图法)比较,具有不受取样长度限制、频谱分辨率较高等优点。因此用最大熵谱方法求得的功率谱较其他方法更准确^[20]。预测误差滤波分析(Prediction Error Filter Analysis,简称PEFA)是在最大熵谱分析结果的基础上,通过计算每一个深度点的MESA预测值和对应的测井曲线真实值而得到数据差值(误差=实际数据-滤波数据)。PEFA曲线是一条沿着垂线变化的不规则的锯齿状曲线,如果在理想数值模拟下,PEFA曲线

形态就类似于反射系数(图 1),如果上面是砂岩层或硬地层,下面是泥岩层或软地层,则 PEFA 曲线尖端拐点是小于 0(负向尖峰),如果上面是泥岩层或软地层,下面是砂岩层或硬地层,则 PEFA 曲线尖端拐点是大于 0(正向尖峰)。综合预测误差滤波分析(Integral Prediction Error Filter Analysis, or Spectral Trend Attribute Analysis, 简称 INPEFA)(频率趋势属性分析)是对 PEFA 曲线采用特定的积分处理后所获得的一种更有价值的曲线,它能够显示通常在原始测井曲线中显示不出来的趋势和模式。

2 分析方法

上面制作了理论地质模型及其响应特征,为达到地质模型响应特征对地层的划分效果,作者设计了较为完善的技术思路(图 2),对测井数据进行频谱分析^[21],其中综合预测误差滤波分析是新方法,也是实现地层划分响应特征的核心技术。之前,最大熵谱分析是周期性现象研究中最常用的一种统计分析方法,首先在最大熵(MEM)方法基础上对测井曲线进行最大熵频谱分析,然后对熵谱分析结果进行预测误差滤波分析,得出 PEFA 属性线识别地层边界,最后对 PEFA 属性线进行积分处理转换为一条更有价值的 INPEFA 曲线,该曲线反映了地层层序边界、叠置序列及基准面变化的特征。

预测误差滤波分析(PEFA)方法是特别为研发如何从测井曲线中提取出地层界面、沉积间断及岩相变

化而设计的。PEFA 是在 MESA 基础上,通过计算每一个深度点的 MESA 预测值和对应的测井曲线真实值而得到数据差值(误差 = 实际数据 - 滤波数据)。产生 PEFA 的步骤为:1) MEM 在包含气候信号变化的地层中,提取岩相变化和气候变化之间存在的一种内在联系,然后在一定的间隔内把这些信号合并成统计模型,这就是既准确又简洁的 MEM 模型;2) MEM 模型作为一个预测滤波器提取地层中的信息,当地层中出现地层间断、缺失或岩相变化时, MEM 模型就会捕获到测井曲线上隐含的频谱跳跃;3) 使用滑动窗口技术,从曲线上预测出来的全部误差存储在 PEFA 曲线中。PEFA 曲线是一条沿着垂直线变化的不规则的锯齿状曲线。PEFA 曲线可以解释为一种地层连续性的指示器,正向尖峰(正值误差)代表可能的层序界面;负向尖峰(负值误差)代表可能的洪泛面;不同大小的尖峰(误差)意味着不同规模的等时界面。

INPEFA 是 Integrated PEFA 的简称, INPEFA 曲线是对 PEFA 曲线采用特定方法积分处理后所获得的一种更有价值的旋回线。它能够显示通常在原始测井曲线中显示不出来的趋势和模式(图 3)。INPEFA 曲线的关键特征是曲线趋势本身和它中间的拐点。文中用此法处理的都是自然伽马(GR)曲线,所得的 INPEFA 曲线的偏度与 GR 曲线特征有关,任一深度点的曲线值(偏度)不仅受 GR 值的影响,更重要的是还受积分区间的影响。INPEFA 技术仅是利用 INPEFA 曲线的相对幅度变化特征,即曲线的形态、趋势和拐点,而不研究其绝对数值的变化。在通常情况下, INPEFA 曲线

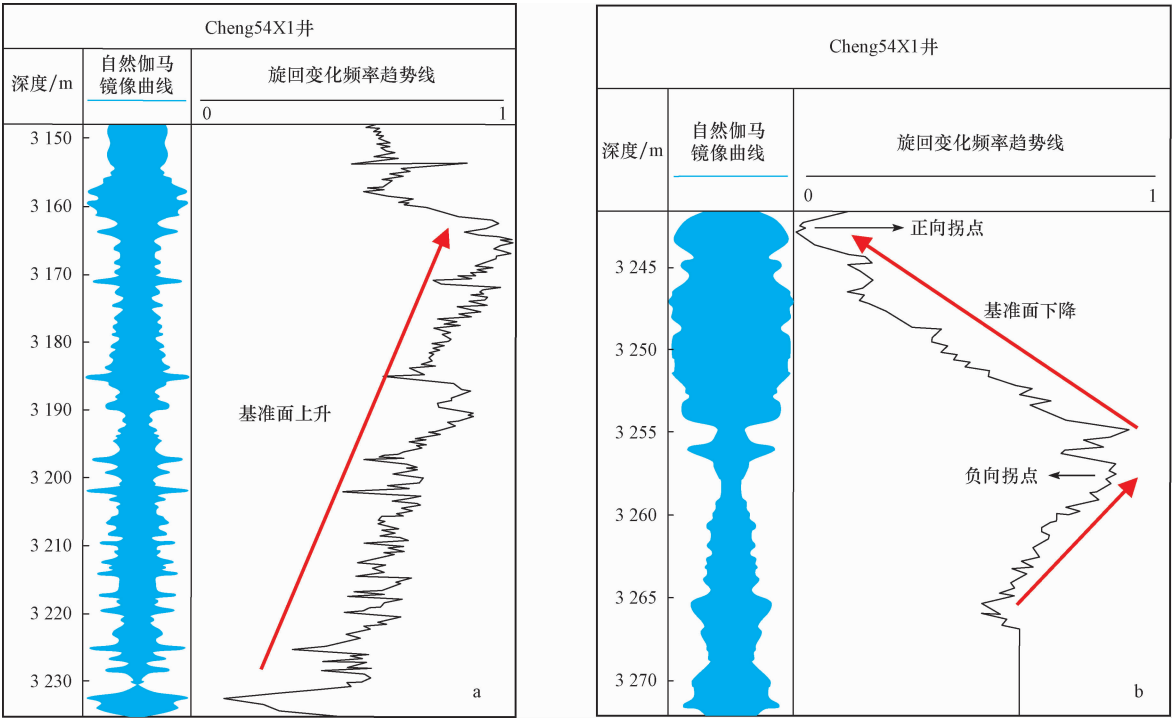


图 3 频率趋势线识别地层旋回

Fig. 3 Identification of sedimentary cycles by frequency trend lines

中一个正的趋势(曲线数值由左向右变大、曲线形态由左向右升高)意味着一种气候逐渐湿润的水进过程;一个负的趋势(曲线数值由右向左变小、曲线形态由右向左降低)意味着一种气候逐渐干旱的水退过程;而转折点则指示一个层序界面或层序内的特征界面(海侵面或洪泛面),其中负向拐点(曲线形态由升高变为降低,对应 PEFA 曲线的负向尖峰)代表可能的洪泛面;正向拐点(曲线形态由降低变为升高,对应 PEFA 曲线的正向尖峰)代表可能的层序界面;并且不同级别的拐点指示不同级别的等时界面^[22]。

3 地层旋回及层序界面识别

3.1 地层旋回的识别及地质意义

沉积地层的旋回性是地层基准面相对于地表位置周期性变化(产生可容空间周期性变化)的地层响应。地质历史上不同级次的基准面旋回,形成了不同级次的地层旋回。因此,可以通过对基准面旋回的识别来划分不同级次的旋回地层单元,综合预测误差滤波分析又称频率趋势属性分析,正好能提取出各种拐点变化的频率趋势旋回线,反映了不同级别的沉积旋回和界面特征。

测井资料以其数量多、连续性好等优点成为提取频率趋势线的主要资料来源,测井资料本身包含了丰富的地层信息,能够敏感、连续地反映所测地层的成层性和旋回性特征,特别是 GR 和 SP(自然电位)曲线^[23-24]。地层沉积过程中的周期性规律会相应地体现在测井资料所包含的信息中,对测井数据进行综合预测误差滤波分析,目的在于充分挖掘测井资料中所包含的地层信息,建立测井数据与地质层序体的映射关系,提取隐藏的地层序列周期性特征及界面,并找出其主要的周期,描述目的层的地质特征,进而更精确地、自动划分沉积旋回。综合预测误差滤波分析技术作为一种地球物理处理方法,可以将任何测井曲线处理成频率趋势旋回曲线,由于测井曲线本身有差异,所以其意义不同。

图3是对大港油田 Cheng54X1 井提取的反映地层叠置序列及旋回变化的频率趋势线,该频率趋势线的地质意义为:1)该频率趋势线呈现为明显的旋回形态,而且这种形态是多个或多级旋回叠加后的复合旋回形态,它正好对应于沉积地层的旋回性;2)频率趋势线在数值上左刻度是0,右刻度是1(图3a),频率趋势线从左侧小值变化到右侧高值,为正变化趋势,对应基准面上升,反映了当时气候逐渐潮湿,水体上升,一般反映了地层正韵律的变化趋势;3)频率趋势线从右侧高值变化到左侧低值,为负变化趋势,对应基准面下降,反

映了当时气候逐渐干旱,水体下降,一般反映了地层反韵律的变化趋势(图3b);4)频率趋势线的变化趋势很明显地反映了地层的周期旋回性变化和垂向叠置序列,进一步分析拐点的地质意义可知,趋势线从右侧高值变到左侧低值,再从左侧低值变到右侧高值,对应一个拐点,该拐点为正向拐点,一般反映的是地层的层序界面;5)频率趋势线从左侧低值变化到右侧高值,再从右侧高值变化到左侧低值,对应一个拐点,该拐点为负向拐点,一般反映的是洪泛面(图3b)。

3.2 地层叠置序列及界面识别

根据频率趋势线反映地层旋回的变化,作者进一步研究了频率趋势线在层序界面识别中的应用。层序地层学研究的首要任务是如何识别不同级别的层序界面,层序边界的形成代表了某一时间段内一定地区发生了沉积间断。因此,层序界面上下沉积岩层的岩性、沉积相组合等都会发生相应的变化,层序界面在电测曲线上会产生相应的响应特征。作者采用综合预测误差滤波分析方法,把层序界面的响应特征提取出来,得出更直观、更明显的层序界面标志。

图4是利用综合预测误差滤波分析方法对大港油

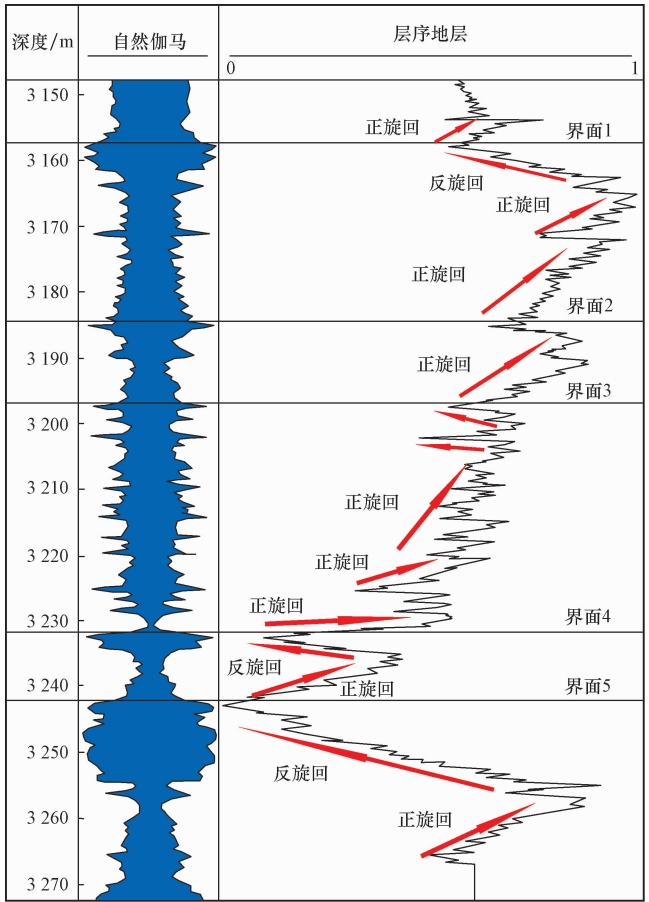


图4 综合预测误差滤波分析方法识别层序界面
Fig.4 Recognition of sequence boundaries through
integral prediction error filter analysis

区 Cheng54X1 井沙一下段自然伽马测井数据处理提取出来的频率趋势线。根据频率趋势线的拐点、变化趋势及地质意义进行地层界面识别及层序划分。通过分析频率趋势线可以明显的得出:1) 该井沙一下亚段频率趋势线存在明显的正向趋势、正向拐点和负向趋势、负向拐点。根据拐点及趋势线的地质意义,由下向上,从正向趋势(曲线数值增大,对应为正旋回)到负向趋势(曲线数值减小,对应为反旋回)的拐点为负向拐点,一般对应洪泛面。而从负向趋势变化到正向趋势的拐点为正向拐点,一般对应层序界面或地层界面,由此可知,该段地层很容易的识别出 5 个大的层序界面。2) 从正向趋势(正旋回)变化到负向趋势(负旋回),构成一个完整的旋回序列,对应为一个层序或地层单元。3) 通过频率趋势线变化可以大致反映出该段沉积环境的变化。一般正向变化趋势即正旋回,反映了当时气候逐渐湿润,水体逐渐抬升,沉积物供应量减少,逐渐形成湖泛面,反映湖盆扩张过程。负向变化趋势即反旋回,反映了当时气候逐渐干旱,水体逐渐下

降,沉积物供应量增大,反映湖盆收缩的过程。4) 图 4 左边是自然伽马镜像图。通过与现场地质分层对比可知,这 5 个界面都对应不同的地层界面。其中,界面 1 为板桥油层组 2 段的底界面,界面 2 为板桥油层组 3 段的底界面,界面 3 为板桥油层组 4 段的底界面,界面 4 是滨海 1 段的底界面,同时也是沙一下的底界面,界面 5 是滨海 2 段的底界面。因此,频率趋势线可以自动实现对地层的等时划分,划分精度高且快速高效。

4 综合预测误差滤波分析方法的应用

4.1 在各级层序地层划分中的应用

根据频率趋势线的地质意义及在层序界面和地层旋回叠置序列识别中的应用,基本实现了地层单元的自动划分。但为了满足不同级别地层单元划分及对比的需要,作者还设计了较为完善的技术思路:1) 首先对地层划分的井段作综合预测误差滤波处理,提取出该地层的频率变化趋势线,根据拐点及趋势线的变化进

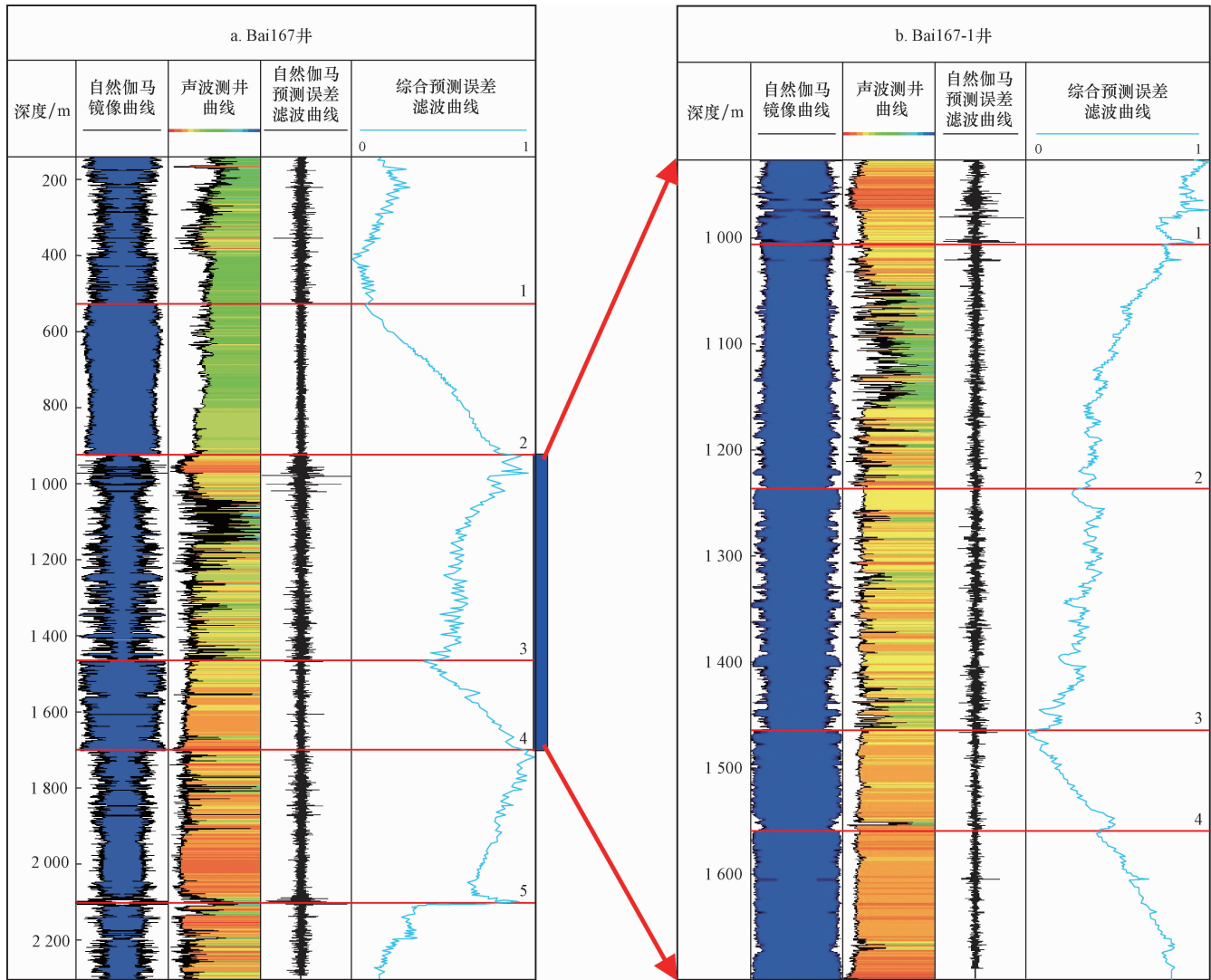


图 5 利用综合预测误差滤波分析方法划分各级地层层序

Fig.5 Sequence stratigraphic division through integral prediction error filter analysis

行地层划分;2)在大级别层序地层划分的基础上,为了进一步细分地层,把其中某个层段单独处理,提取其频率变化趋势线,进行精细地层划分。

图5是利用综合预测误差滤波分析方法进行地层层序划分的结果,从图上频率趋势线变化可以很清晰地看出层序界面的特征:1)该段地层从下向上的频率趋势线有明显的拐点和变化趋势,图5左图频率趋势线存在5个明显的拐点和6种变化趋势,根据拐点和趋势变化的地质意义,很容易识别出6个相同级别的地层单元,由上到下依次为1,2,3,4,5和6号层,对应为6个不同的准层序组单元;2)根据拐点及趋势线变化识别出6个地层单元,即6个准层序组,然后对其中两个地层单元——3和4地层单元(准层序组)进一步处理,提取出精细的频率趋势旋回线,如图5右图,存在4个明显的拐点和5个频率变化趋势线,又进一步划分出5个地层单元,即5个准层序,每个变化趋势代表每个准层序,反映了相同时间下的沉积状况和等时层。

4.2 在等时地层对比中的应用

上面讨论了预测误差滤波分析方法在地层旋回、界面识别及层序划分中的应用,重点介绍了频率趋势线的地质意义。地层界面及不同级别层序的识别为等时地层对比奠定了基础,但在作地层对比时,最重要的还是同一级别地层进行对比,即在同一等时地层单元界面控制下的层序地层对比,这才能保证地层对比的等时性和准确性。要确保多井之间(区域地层之间)各级地层划分对比的精确性需要做到以下几点:1)作地层划分对比之前,先要了解该区域地层的沉积构造及地层叠置状况,使下一步精细地层对比有一个基础性的认识;2)搞清该区域地层划分状况,对区域地层划分有一个清楚的认识;3)选定要作地层对比的井和层段,所选同一层段的界面都是前人的研究成果,其界面一般都是准确且等时的,在此基础上,进一步作不同级别层序下的精细地层(小层)等时对比;4)在选定层段的基础上,对整理好的测井数据(一般是自然伽马)作综合预测误差滤波处理,提取出反映层序界面和不同叠置序列旋回变化的频率趋势线;5)根据频率趋势线的变化趋势和幅度,从下向上,找出变化趋势和幅度大小相近的拐点和趋势线,一般正拐点定为层序界面,按此由下向上依次确定出同一层序级别的不同界面;6)多井之间根据层序界面和频率趋势线作地层对比,即同一邻近井区相同层的频率变化趋势具有一致性;7)在上面地层划分对比的基础上,单独拿出某个等时层,进一步缩小处理窗长做综合预测误差滤波处理,提取出更精细的频率趋势线和拐点变化,找出小层的层

序界面,作高精度的小层等时对比,这样依次下去,即可满足在油气勘探开发不同阶段的地层划分及对比的需要。

图6是通过综合预测误差滤波分析方法对长庆油区6口井的自然伽马数据进行处理、提取出频率趋势线用于地层划分对比的成果,其中图5已对其中一口井的地层划分状况进行了说明。通过处理提取出来的6口井的频率趋势线,从下向上,可以明显的得出如下结果:1)首先这6口井的频率趋势线和拐点具有明显的一致性,从变化趋势到拐点都是一样的,证明了该段地层的等时性;2)从每口井底部,由下面第一个拐点开始,即6口井下面连接的第一条红线对应的拐点开始向上频率趋势值逐渐增加,响应特征是一致的,都是正向趋势,即正旋回,则6口井的第一个层的层序界面是明显的且该层是等时的;3)按此规律依次向上划分对比,上面每个拐点及对应的频率趋势具有明显的一致性,分别对应为一个层,每个层的层序界面和变化趋势都是一致的,层序界面对应的拐点非常明确且6口井频率趋势线的响应特征具有一致性;4)图5中每个层都用红线标出来了,从下到上一共有5个层,与现场分层对比可知,这5个层对应5个准层序组,每个准层序组的拐点及趋势线具有明显的一致性。

在以上6口井地层划分对比的基础上,为了满足开发需要,进一步作精细小层划分对比,对上面6口井划分出的第3、4层(准层序组)进一步处理分析,提取出其频率趋势变化,进行精细地层划分对比(图7),频率趋势线存在4个拐点和5段趋势线,即原来2个准层序组(四级层序)被划分为5个准层序(五级层序)。

5 结论

1)综合预测误差滤波分析方法是一种地层划分对比的新方法,能准确且自动识别地层界面和旋回的变化。

2)提取出来的频率趋势线是基准面旋回变化的一种响应特征,其拐点和变化趋势反映了地层界面和地层旋回的变化,间接反映了沉积环境的变化。

3)综合预测误差滤波分析方法提取的频率趋势线能够反映各级地层的旋回变化,即大的地层单元有大的变化幅度和大变化趋势,小的地层单元有小的变化幅度和小变化趋势,能够实现对各级地层单元的识别划分。

4)对各级地层单元实现划分的基础上,根据频率趋势线的变化趋势,由下向上逐次进行地层对比,按照由大级别地层到小级别地层对比的原则,实现了各级地层单元的等时对比。

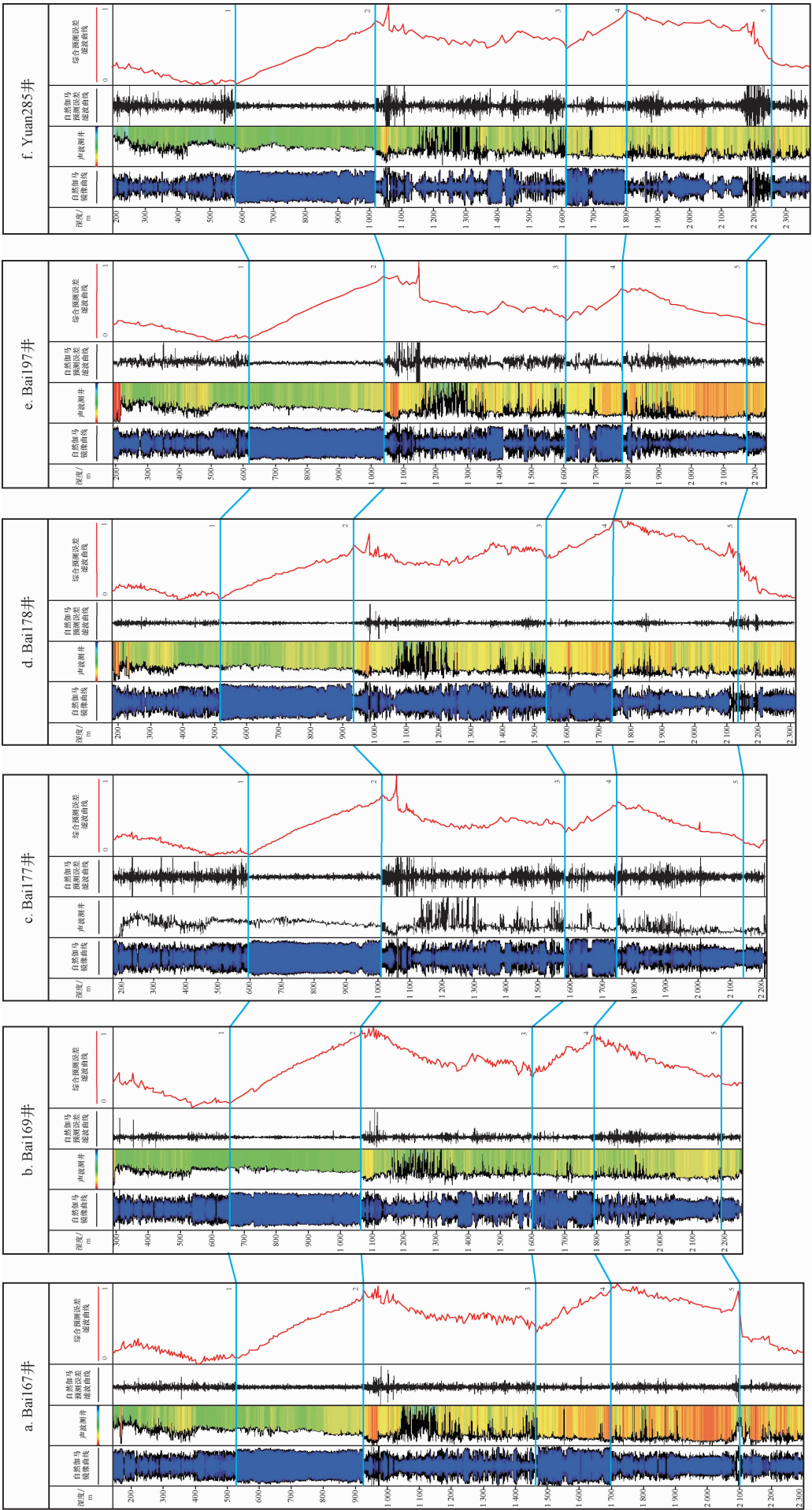


图6 利用综合预测误差滤波分析方法进行多井对比
Fig. 6 Multi-well correlation through integral prediction error filter analysis

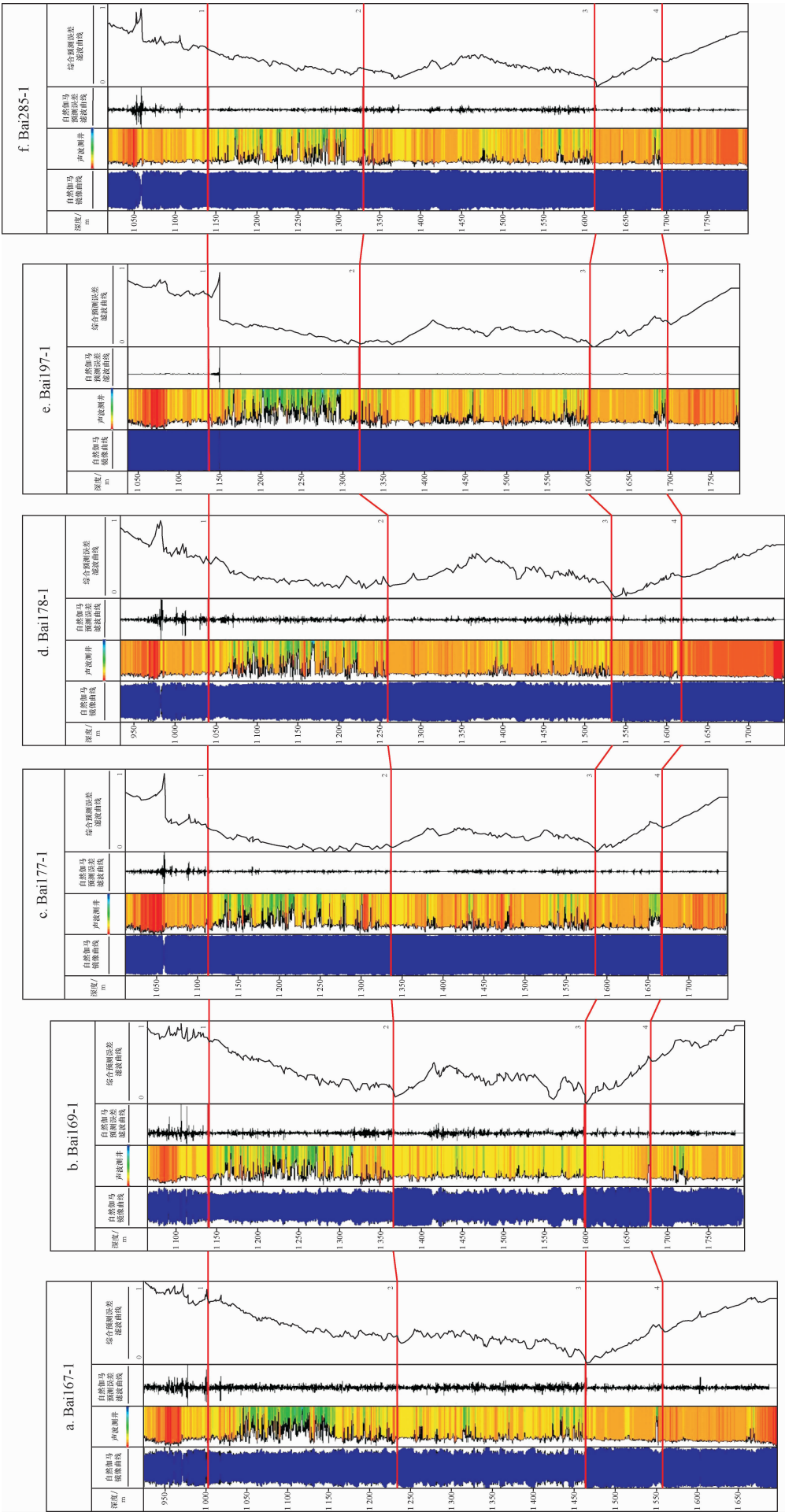


图7 精细地层划分对比成果
Fig. 7 Results of fine stratigraphic division and correlation through integral prediction error filter analysis

参考文献

- [1] Brett C E, Algeo T J, Mclaughlin P I. Use of event beds and sedimentary cycles in high-resolution stratigraphic correlation of lithologically repetitive successions [J]. High-Resolution Approaches in Stratigraphic Paleontology, 2008, 21: 315 – 350.
- [2] Berger A. Milankovith theory and climate [J]. Review of Geophysics, 1988, 26(4): 624 – 657.
- [3] Kemp F. An algorithm for the stratigraphic correlation of well logs [J]. Mathematical Geology, 1982, 14(3): 271 – 285.
- [4] Shanley K W, Maccable P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544 – 568.
- [5] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequence in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125 – 142.
- [6] 徐敬领, 王贵文, 刘洛夫. 利用小波深频分析方法研究沉积储层旋回 [J]. 中国石油大学学报, 2009, 33(5): 1 – 5.
Xu Jingling, Wang Guiwen, Liu Luofu. Study of sedimentary reservoir cycles using wavelet depth-frequency analysis method [J]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(5): 1 – 5.
- [7] 宋子齐, 景成, 孙宝佃, 等. 自然电位、自然伽马测井曲线在文15块的应用 [J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 130 – 133.
Song Ziqi, Jing Cheng, Sun Baodian, et al. Application of self-potential and gamma ray logging curves in Block Wen 15 [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 130 – 133.
- [8] 刘迪仁, 谢伟彪, 殷秋丽. 水平井不平整界面地层中感应测井模拟及影响分析 [J]. 石油物探, 2012, 51(1): 86 – 90, 97.
Liu Diren, Xie Weibiao, Yin Qiuli. Simulation and analysis on induction logging of the formation with uneven boundary in horizontal well [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 86 – 90.
- [9] 施冬, 张春生. 基于改进的 GM(1,1) 模型的高分辨率声波测井数据滤波处理 [J]. 石油物探, 2011, 50(3): 315 – 318.
Shi Dong, Zhang Chunsheng. Filtering of high-resolution acoustic log data based on modified GM(1,1) model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(3): 315 – 318.
- [10] 庄东志, 周凤鸣, 司兆伟, 等. 南堡5号构造深层火山岩岩性测井识别技术 [J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 743 – 745.
Zhuang Dongzhi, Zhou Fengming, Si Zhaowei, et al. Logging identification of deep volcanic lithology in No 5 structure of Nanpu Sag [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 743 – 745.
- [11] Van Wanger J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration Series, 1990, 7: 1 – 55.
- [12] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High frequency sequences and their stacking patterns: sequence stratigraphic evidence of high frequency eustatic cycles [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2 – 4): 131 – 160.
- [13] Xu Jingling, Liu luofu, Wang Guiwen, et al. Geophysics methods for the study of sedimentary cycles [J]. Petroleum Science, 2009, 6(3): 259 – 265.
- [14] Rudman A J, Lankston R W. Stratigraphic correlation of well logs by computer techniques [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(3): 577 – 588.
- [15] 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): 1 – 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): 1 – 9.
- [16] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249 – 255.
Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249 – 255.
- [17] 王贵文, 邓清平, 唐为清. 测井曲线谱分析方法及其在沉积储层旋回研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 93 – 95.
Wang Guiwen, Deng Qingping, Tang Weiqing. The application of spectral analysis of logs in depositional cycle studies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1): 93 – 95.
- [18] 杨勇强, 邱隆伟, 陈世悦, 等. 基于小波能量谱系图及小波曲线的层序地层划分 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 783 – 789.
Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Chen Shiyue, et al. Sequence stratigraphy identification based on wavelet energy spectrum and wavelet curve [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(5): 783 – 789.
- [19] Djin N, Brouwer J, Smith D, et al. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs [J]. First Break, 2005, 23(4): 71 – 75.
- [20] 樊太亮, 李庆谋. 沉积基准面变化分析技术及其应用 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 108 – 113.
Fan Tailiang, Li Qingmou. Analysis techniques of sedimentary base-level and their application [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 108 – 113.
- [21] 肖佃师, 卢双舫, 陈海峰, 等. 基于频谱分解的测井曲线标准化方法 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 129 – 136.
Xiao Dianshi, Lu Shuangfang, Chen Haifeng, et al. Logging data normalization based on frequency spectral decomposition [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 129 – 136.
- [22] Herbert T D, Fischer A G. Milankovitch climatic origin of mid-Cretaceous black shale rhythms in central Italy [J]. Nature, 1986, 321: 739 – 743.
- [23] Mat D, Jong G G, Djin S, et al. Resolving climate change in the period 15 – 23ka in Greenland ice cores: a new application of spectral trend analysis [J]. Terra Nova, 2009, 21(2): 137 – 143.
- [24] Jong M, De G G, Nio S D, et al. Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate-stratigraphic approach [J]. First Break, 2007, 25: 49 – 59.

(编辑 张亚雄)