

精细井—震标定研究沉积层序旋回的方法

徐敬领*^{①②③} 刘洛夫^④ 邹长春^{①②③} 张亚雄^{①②}

(^①地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083; ^②地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室,北京 100083; ^③中国地质大学地球物理与信息技术学院,北京 100083; ^④中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

徐敬领,刘洛夫,邹长春,张亚雄.精细井—震标定研究沉积层序旋回的方法.石油地球物理勘探,2012,47(6):990~997

摘要 为了解决沉积层序旋回的精细划分及在纵横向二维空间上的变化规律和横向延拓对比问题,本文提出利用小波深频分析方法,数值模拟出不同米氏周期旋回的单信号及复合信号,对模拟的多期复合信号再分解为单个频率旋回的单信号,并研发了井—震标定插入技术,实现了把单井频谱旋回特征标定到地震剖面中,进而搞清了频谱旋回在纵向、横向二维空间上的变化规律及展布特征,为确定区域沉积层序旋回的变化、地下地层结构及接触关系指明了方向。

关键词 沉积层序旋回 小波深频分析 米氏旋回 井—震标定 频谱旋回 测井

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

沉积地层不仅具有成层性,而且具有旋回性,自然界中复杂的周期运动都是由多个不同周期的简单运动叠加而成的,沉积旋回是沉积事件的周期性重复^[1~3]。如何把这些多期叠加的复杂地层分解成单个周期的单一地层,很多研究者将傅里叶变换、短时傅里叶变换、周期图法、小波变换等算法用于研究沉积旋回问题^[4~6],进而解决复杂地层分解问题。但这些算法都是简单地处理一系列地震数据或一系列测井数据,并从中提取频谱特征数据,分析沉积旋回的变化。这类处理旋回分析方法的缺点是准确性和精度都不高,也没有解决横向和纵向二维空间上频率旋回的变化问题,且这些算法分析沉积旋回的机理也不明确。

本文基于以上现状和问题,应用小波深频分析方法,数值模拟出典型旋回——米氏周期旋回,对模拟的多期复合旋回信号分解成反映单个频率旋回的单信号,并研发了井—震标定插入技术,实现了将测

井数据的频谱特征标定到地震剖面中,进而解决了频率旋回的横向、纵向延拓问题,为确定区域沉积旋回的变化指明了方向。

2 小波深频分析方法及沉积层序旋回的数值模拟

2.1 小波深频分析方法

小波深频分析方法是在时频分析的基础上,采用一维小波变换算法,通过对不同深度数据采用“沿层分频多尺度自动处理”和“高分辨率剖面重建”等方法,逐步变换成按频率高低依次展开的深频剖面,该剖面反映的地质特征与地质目标体一一映射,尤其能反映和刻画地层的高频层序旋回特征。该方法主要对测井数据进行处理提取其频谱旋回特征,也可以对地震、电法、重力等其他数据进行处理提取其频谱旋回特征。测井数据的分解和重建是深频分析的基础,把单条测井曲线或多条测井曲线的耦合曲线分解并重构出不同频段的分频剖面。

设测井信号或反射系数为 $f(t)$,它的连续小波

* 北京市海淀区学院路29号中国地质大学地信学院教五楼220,100083。Email:jlxu@cugb.edu.cn

本文于2012年1月15日收到,最终修改稿于2012年9月13日收到。

本研究受中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0103)、国土资源部公益性行业科研专项(2013111107)和中央高校基本科研业务费项目(2011YYL128)资助。

变换^[7,8]为

$$W_{\Psi}^f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_{\Psi}}} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int \Psi\left(\frac{b-\tau}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

其中

$$c_{\Psi} = 2\pi \int \frac{|\bar{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (2)$$

而

$$\bar{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \Psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

式中: $W_{\Psi}^f(a, b)$ 为分析小波或连续小波, 在实际处理中为得出的小波系数值, a 为尺度, b 为位置; τ 为平移点; t 为信号因子; c_{Ψ} 为可容许性条件; $\Psi(t)$ 为母小波, $\bar{\psi}(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 频谱, 反映旋回的响应特征。以上参数都是标量, 无单位。由 $W_{\Psi}^f(a, b)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 求函数 $f(t)$ 的过程称为 $f(t)$ 的重建或小波反变换, 即

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{c_{\Psi}}} \iint |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) W_{\Psi}^f(a, b) \frac{1}{a^2} da db \quad (4)$$

其中 $f(t)$ 和 $W_{\Psi}^f(a, b)$ 应保证一定程度的能量守恒或者同构性。

该方法的主要功能: ①提高了纵、横向分辨率, 提取出的频谱旋回响应特征能真实地反映和刻画沉积层序旋回, 并与地下地层的沉积层序旋回一一对应, 亦能反演出其他一些沉积特性; ②具有较强的抗干扰能力; ③旋回界面显示较清晰, 不同频率的频谱旋回能清楚划分不同级次的沉积旋回。

2.2 沉积层序旋回数值模拟

沉积层序旋回具有周期性、韵律性和旋回性的特征^[9~11], 如何把这些特征提取出来或把复杂的沉积层序旋回还原成单个的周期旋回, 如何用数学或地球物理的语言来描述单个或叠加沉积层序旋回? 基于这些问题, 笔者选用经典旋回类型——米氏(米兰科维奇)旋回作为数值模拟的对象, 来刻画沉积旋回的特征。米氏旋回是如今公认的高频层序旋回, 由偏心率、岁差、黄赤夹角三个地球轨道运动周期参数控制, 这三个地球轨道运动参数的周期性变化造成了沉积地层的周期性叠置序列, 形成了米氏层序旋回, 该层序旋回属于高频层序旋回^[12,13]。用数值模拟方法模拟出偏心率、黄赤夹角、岁差三个运动周期参数的单信号及复合信号, 对这些信号做频谱分析, 分析米氏旋回的自身特征, 进而提取沉积层序旋回的特征。根据模拟结果, 可以对真实地层(测井、

地震等信号)的沉积层序旋回特征展开研究。

图 1 是对偏心率、黄赤夹角、岁差三个运动参数进行数值模拟的结果, 图中 5 个单正弦信号分别是对长偏心率(413ka)、短偏心率(100ka)、黄赤夹角(40ka)、长岁差(22.5ka)、短岁差(19ka)等 5 个地球轨道运动参数周期的模拟, 这五个单信号的叠加组成一个复合信号。假设图 1 中是一套 180m 厚的地层, 该套地层是由 5 种不同沉积周期的地层单元叠置而成, 且地层信息全部包含在复合信号中, 复合信号包含 5 种不同周期的单信号, 分别由 3 个长偏心率周期、14 个短偏心率周期、35 个黄赤夹角周期、63 个长岁差周期和 75 个短岁差周期组成。以上信息是对典型沉积层序旋回(米氏旋回)模拟的结果, 能直接从模拟图 1 中分离出来。

但在实际地层划分中, 每个地层包含几个地层单元、每个地层单元的级别、厚度及沉积时间等都是未知的。以目前的研究手段, 只能拾取到大的地层单元及界面, 对小地层单元的识别存在差异。在实际地层研究中, 最有力资料就是根据地震剖面或测井曲线进行地层单元的划分, 但划分结果存在多解性。图 1 右边第二列是对数值模拟单信号叠加求取的复合信号, 该复合信号包含地层的各种信息, 相当于实际地层的测井信号。图 1 最右边一列是对复合信号做快速傅里叶变换提取的频率信息图, 从图 1 右边频率图中可明显看出复合信号包含 5 种不同频率成分, 即复合信号是由 5 种不同频率成分的单信号组成。每种单信号对应一个地球轨道运动参数, 每个轨道参数对应一定的沉积层序旋回周期, 所以 5 种不同频率成分反映了 5 种不同沉积厚度、不同沉积时间(周期)的地层旋回周期。图 2 是对复合信号进行处理提取的振幅频谱图, 即波长和振幅谱图。从图 2 可明显看出, 该频谱图包含 5 个波长, 每个波长对应一种主频, 即 5 种主频, 每个波长(主频)对应一类沉积周期, 分别是 413ka、100ka、41ka、23ka 和 19ka 等 5 类沉积周期, 这 5 类沉积周期分别对应 5 个地球轨道运动周期, 说明该段地层不仅包含米氏层序旋回, 而且该段地层包含 5 类不同沉积周期的地层叠置序列。

2.3 数值模拟响应特征分析

虽然已知地层的复杂信号可被分解为不同频率的单信号, 每种单信号的频率谱对应一类沉积周期的地层单元, 但这一类沉积周期地层单元的个数未

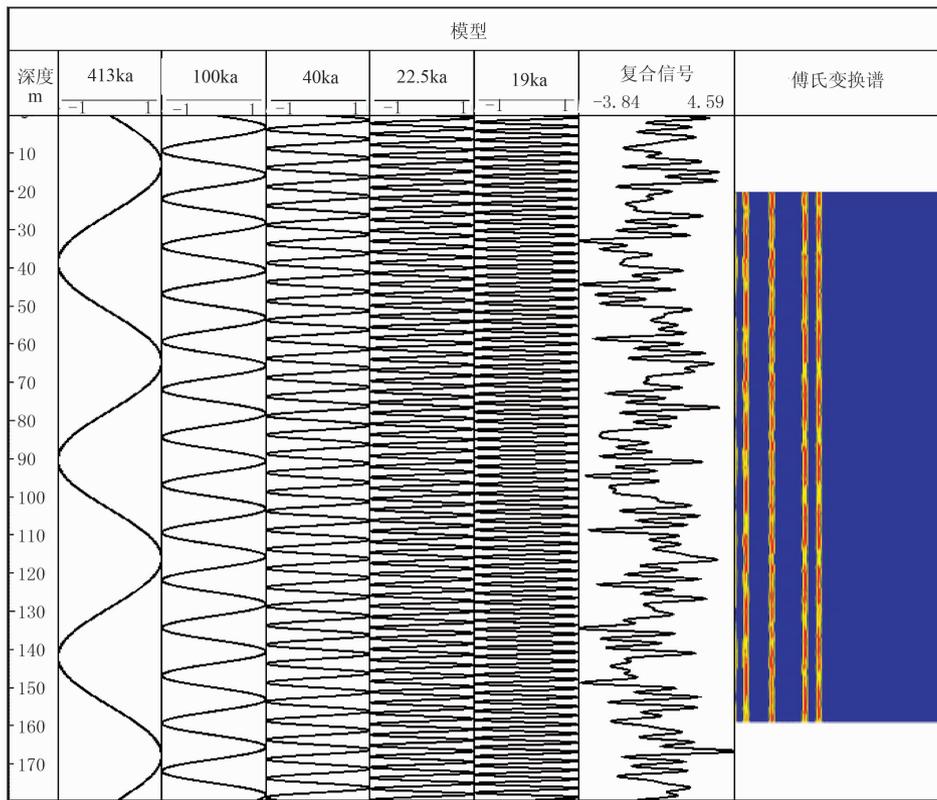


图 1 米氏旋回周期的数值模拟结果

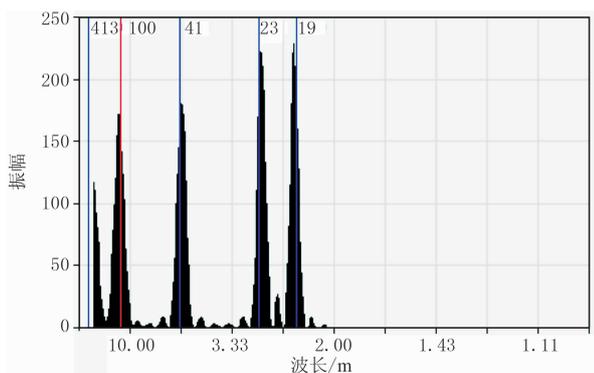


图 2 图 1 中的复合信号的振幅频谱图

知,即该段地层包含的长偏心率周期(413ka)、短偏心率周期(100ka)、黄赤夹角周期(40ka)、长岁差周期(23ka)以及短岁差周期(19ka)地层单元的个数未知,且界面也是未知的。

为了解决上述问题,仅靠傅里叶变换无法完成。笔者进行了大量的试验及研究,提出小波深频分析。首先用两个单信号(413ka 和 100ka)模拟该段地层的沉积层序特征(图 3)。图 3 左侧三列分别是深度、长偏心率周期信号(413ka)和短偏心率周期信号(100ka),第四列是前两个信号的复合信号 Com413

~100,第五列是对复合信号做的频率趋势分析线,右边一列是对复合信号采用尺度 $a=256$ 做的小波深频分析剖面。对频率趋势线的响应特征(图 3 右边第 2 列)赋予地质意义可知:①该套地层包含三个大的完整的频率趋势变化周期,且每个大的频率趋势变化又包含 4 个小的频率趋势变化周期;②每个大的频率趋势变化周期与长偏心率信号周期(413ka)一致,且界面完全吻合,每个小频率趋势变化周期与短偏心率信号周期(100ka)一致,界面也完全吻合;③该套地层包含两类不同沉积周期的地层单元,一类是长偏心率周期(413ka)的地层单元,即大地层单元,据前人研究成果^[14],一般对应四级层序旋回;一类是小偏心率周期(100ka)的地层单元,即小地层单元,一般对应五级层序旋回;④该套地层包含 3 个大周期(长偏心率周期)的地层单元,14 个小周期(短偏心率周期)的地层单元(中间 12 个加上顶底两个短偏心率周期地层单元一共是 14 个)。

对小波深频图的响应特征(图 3 右边第 1 列)赋予地质意义可知:①小波深频图中间分开,两边是对称的,从两边到中间其频率是逐渐降低的,即两边是高频率,中间是低频率,从两边高频逐渐向中间低频

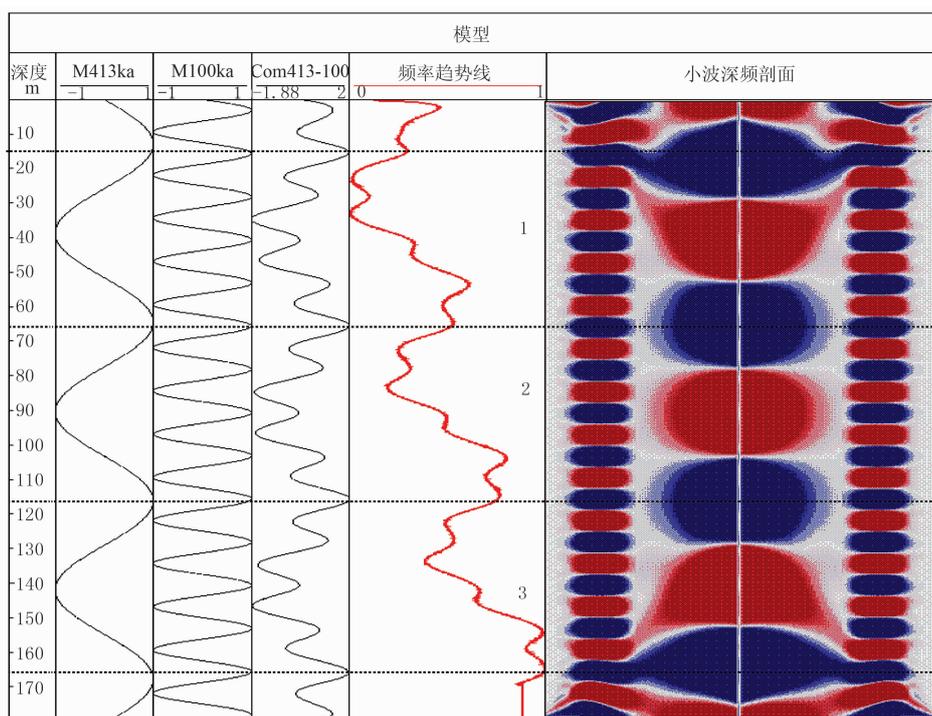


图 3 两种模拟单信号组合的响应特征

过渡;②小波深频剖面是红、蓝频率谱能量团的叠加,红色频率谱能量团一般代表地层的骨架部分,蓝色频率谱能量团一般代表相对静水沉积层,即非骨架,反映界面特征;③中间低频部分包含 3 个完整的大红色频率谱能量团,两边高频部分(除顶底)包含 12 个完整的小红色频率谱能量团,且每个大的红色频率谱能量团包含 4 个小的红色频率谱能量团;④两个大的红色频率谱能量团之间夹一个大的蓝色频率谱能量团,一般是地层非骨架部分的响应,反映界面特征。由此,大的红色频率谱能量团与长偏心率信号周期(413ka)是一致的,其界面正好对应蓝色频率谱,与长偏心率信号界面是完全吻合的。每个小的红色频率谱能量团与短偏心率信号周期(100ka)是一致的,小的蓝色频率谱能量团作为界面与短偏心率信号界面也是完全吻合的。⑤该套地层由两类不同沉积周期的地层单元组成,一类是长偏心率周期的地层单元,即四级层序旋回对应的大地层单元,正好与低频率成分的大红色能量团对应,一类是小偏心率周期的地层单元,即五级层序旋回对应的小地层单元,正好与小红色能量团对应。⑥该套地层包含 3 个大周期(长偏心率周期)的地层单元,14 个小周期(短偏心率周期)的地层单元(中间 12 个加上顶底两个短偏心率周期地层单元一共是

14 个),即该套地层由 3 个四级层序旋回与 14 个五级层序旋回组成,且处理尺度为 256,可得知 256 尺度对应低频部分的大红色频谱能量团,一般反映四级层序旋回,两边高频部分为五级层序旋回,128 尺度对应低频部分的红色频谱能量团,正好为 256 尺度高频部分的红色频谱能量团,所以 128 尺度低频部分红色频谱能量团一般反映五级层序旋回。

由此可知,小波深频分析方法不仅把复合信号(测井、地震等)分解为不同频率的单信号,而且能够提取出反映不同级别沉积层序旋回及旋回个数的频谱能量团,即不同尺度的深频剖面对应不同级别的层序旋回,一般 256 尺度对应四级层序旋回,128 尺度对应五级层序旋回,64 尺度对应六级层序旋回;小波深频剖面响应特征反映的地质意义与频率趋势线的地质意义是完全吻合的,同时验证了数值模拟的正确性,以及小波深频分析方法的有效性、精确性。

3 小波深频分析方法用于井—震标定的基础

一般说来,地震资料信息丰富,横向可识别的范围广,可用来识别沉积层序、构造及地层接触情况,

但地震资料的垂向分辨率很低,可识别的地质体和层序比较粗略,也就是说只能识别大级别的层序旋回,不适合做精细研究。而测井资料垂向分辨率很高,可以清晰反映沉积旋回、构造、储层特征等,但其横向分辨率不够,仅局限在井眼范围内。井—震标定联合解释可取长补短,但目前井—震标定联合解释主要是把测井数据利用软件通过合成记录标定到地震剖面上,存在很大的问题。由于测井曲线纵向分辨率高,标定后测井曲线被压缩了,精细的沉积旋回特征并没有反映或反映不清楚,对地震的标定效果不是很好。

为了解决上述问题,实现真正意义上的井—震标定,开发了处理模块——井—震标定插入技术,使测井和地震的匹配性达到最佳的效果。通过该处理模块,可以把各项井筒信息直接插入到地震剖面中进行井—震标定联合解释,在沉积层序、构造、储集

空间识别、岩石物理及油藏描述等精细化研究中发挥重要作用。笔者根据沉积层序旋回数值模拟结果及响应特征,通过井—震标定方法,利用地震和测井资料研究目标区的沉积层序旋回叠置特征及横向延拓性。主要通过时深转换井—震标定技术,采用小波深频分析方法把自然伽马数据处理出来的频谱旋回插入到地震剖面中,进而实现了真正意义上的井—震标定联合解释沉积层序旋回的叠置序列及横向延拓性。该方法主要适用于常规测井数据,如自然伽马(GR)、地层真电阻率(RT)、深侧向(RLLD)、声波时差(AC)、密度(DEN)等识别地层岩性、旋回界面比较真实可靠的数据,但在对常规测井数据处理前一般要做预处理,主要是校正或剔除奇异值。对这些校正好的数据进行处理,则该方法的适用性更强、处理结果更真实有效。

图4是采用井—震标定插入技术把小波深频剖

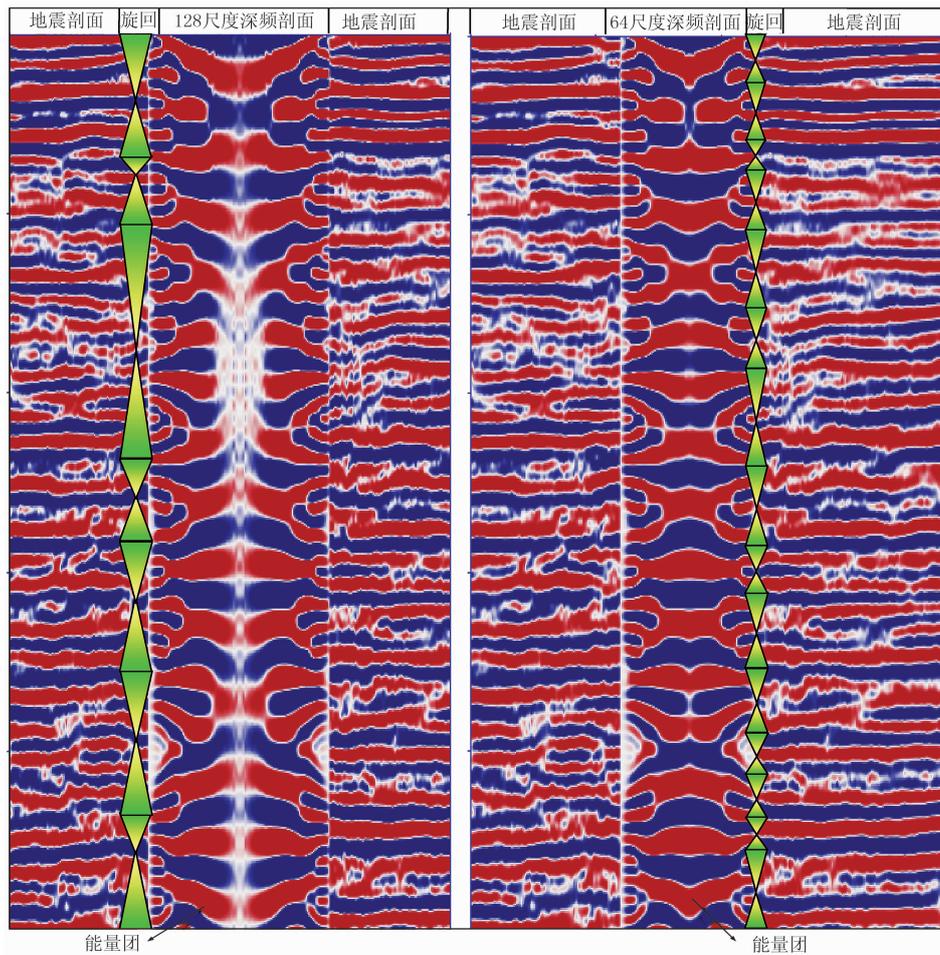


图4 井—震标定联合解释的理论模式

深频剖面呈中间对称型,中间每个红颜色都代表了一个能量团,即红色频率谱,每个能量团都从中间根部向两侧迁移变化,即红色频率谱从中间低频向两侧高频迁移变化。

面插入到地震剖面中,通过标定地震资料进行联合解释的理论模型。对图 4 赋予一定的地质意义,可以得出:①图中小波深频剖面红色的能量团一般是地层骨架部分的响应,蓝色能量团一般是非骨架部分的响应,红色能量团的迁移代表了地层旋回性,红色与蓝色的界面一般反映了各级层序界面,红蓝代表了沉积地层的韵律性、周期性特征。相同频率区间有几个红蓝频率谱能量团的迁移就代表有几个相同级别的沉积层序旋回。②图中左侧小波深频剖面是采用 128 尺度处理提取出来的成果图,右侧小波深频剖面是采用 64 尺度处理提取出来的成果图;由前面数值模拟结果可知,256 尺度频谱能量团旋回对应四级层序旋回,128 尺度频谱能量团对应五级层序旋回,64 尺度频谱能量团旋回对应六级层序旋回。因此,左侧深频图反映的是五级层序旋回,右侧是六级层序旋回,且左侧深频图反映的地层旋回结构、层序级别、能量迁移的幅度都比右侧的大。③把大尺度(128 尺度)的深频剖面标定到地震剖面上,实现了对五级层序的划分,可以划分出 7 个准层序,如果单独靠地震资料是实现不了的。小尺度(64 尺度)的深频剖面标定到地震剖面上,实现了对六级层序的划分,可以划分出 15 个小层,如果单独靠地震资料更是实现不了的。④不同尺度的深频剖面插入到地震剖面中,可以识别出不同级别的层序,而且能确定层序旋回的级别、旋回的个数和叠置序列,实现了对层序地层量化的刻度,解决了仅靠地震资料完成不了的难题。⑤通过井—震标定插入技术,使层序划分的精度和准确度更高,真正实现了井—震标定联合解释。⑥通过井—震标定,实现了地层及砂体真正意义上的等时对比,为圈定油气藏的分布范围奠定了基础。

4 井—震标定联合解释研究沉积层序旋回的实例

把井—震标定插入技术应用于大港油区实际资料,验证其有效性和精确性。图 5 是采用井—震标定插入技术把三口井的深频剖面插入到大港油区 dg001 测线中的应用实例。

图 5 的三个深频剖面均采用 64 尺度处理提取,从图中可以看出,深频图反映的沉积旋回结构、层序级别、层序界面及地层叠置序列非常清楚,图中地震

剖面(dg001 测线)是旅行时间在 1~2s 之间同相轴反射特征的综合响应。

三个深频剖面插入到地震剖面中,其红色频率谱能量团的迁移和红蓝频率谱界面与地震同相轴的响应特征完全吻合,即一个完整的红色频率谱迁移构成一个层序旋回,代表一个层序单元,标定到地震剖面上可以看到,与地震同相轴的界面是吻合的,这就实现了井—震标定联合解释。64 尺度的深频剖面插入到地震剖面中,实现了六级层序—小层单元的划分;通过井—震标定,不仅垂向地层单元得到精细划分,还可以横向延拓至其他井区或其他区域。

图中黄色线是一条明显的层序界面—馆陶组底界面,黄色线上面 X1 井有 4 个红色频率谱能量团迁移,X2 井也有 4 个红色频率谱能量团迁移,而且两口井之间的同相轴是连续的,这说明两个井区之间的地层单元是同一时间沉积,具有相同的沉积环境,沉积厚度相似。黄色线 X3 井有 9 个红色频率谱能量团,与前面两口井具有明显的差异性。通过两井红色频率谱旋回结构、旋回个数以及两井之间同相轴的对比,可以分析出地层的缺失、地层的断陷情况和地层厚度的差异性特征,为地层的等时对比奠定了基础。通过井—震标定插入技术,实现了真正意义上的井—震标定联合解释,效果显著且精确。

为了进一步检验井—震标定插入技术的有效性和精确性,作者扩大尺度处理,把 128 尺度的深频剖面插入到该地震剖面(dg001 测线)中(图 6)。图 6 是采用井—震标定插入技术把三口井 128 尺度的深频剖面插入到大港油区 dg001 测线 1~2s 范围内的应用实例。

从图 6 可知,128 尺度的深频剖面反映的沉积旋回结构、层序级别、层序界面及地层叠置序列也是非常清晰的。三个深频剖面插入到地震剖面中,其红色频率谱能量团的迁移和红蓝频率谱界面与地震同相轴的响应特征也是完全吻合的,即一个完整的红色频率谱迁移构成一个层序旋回,代表一个层序单元,标定到地震剖面上,与地震同相轴界面吻合。只不过 128 尺度对应的一个完整红色频率谱能量团包含的地震同相轴的个数比 64 尺度包含的个数要多,这就实现了通过井—震标定联合解释不同级别的层序单元。128 尺度的深频剖面插入到地震剖面中,实现了五级层序—准层序单元的划分;通过井—震标定,不仅垂向地层单元得到精细划分,还可以横

向延拓至其他井区或其他区域。图中黄色线是一条明显的层序界面——馆陶组底界面,黄色线上面 X1 井有 3 个红色频率谱能量团迁移, X2 井也有 3 个红色频率谱能量团迁移(比 64 尺度的深频剖面少一个),而且两口井之间的同相轴是连续的,说明两个井区之间的地层单元是同一时间沉积,具有相同的

沉积环境,沉积厚度相似。黄色线上面 X3 井有 7 个红色频率谱能量团(比 64 尺度的深频剖面少两个),与前面两口井具有明显的差异。通过两井红色频率谱旋回结构、旋回个数以及两井之间同相轴的对比,可以分析出地层的缺失、地层的断陷情况和地层厚度的差异性特征,为地层的等时对比奠定了基础。

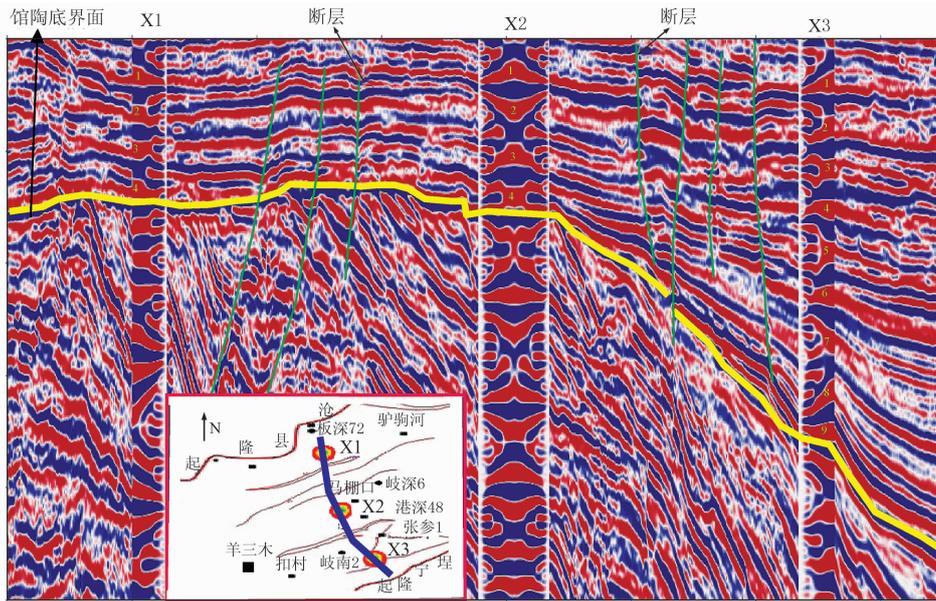


图 5 井—震标定插入技术在大港油区 dg001 测线中的应用

该地震剖面从左到右分别插入 X1、X2、X3 三口井 64 尺度的深频剖面, X1 井深频剖面右边半显示、X3 井左半边显示、X2 井对称显示;黄色线为馆陶组底界面,绿色线为解释断层;在黄色线上面, X1 井有 4 个红色频率谱能量团, X2 井也有 4 个红色频率谱能量团, X3 井有 9 个红色频率谱能量团,图中标注的黄色数字即为能量团。

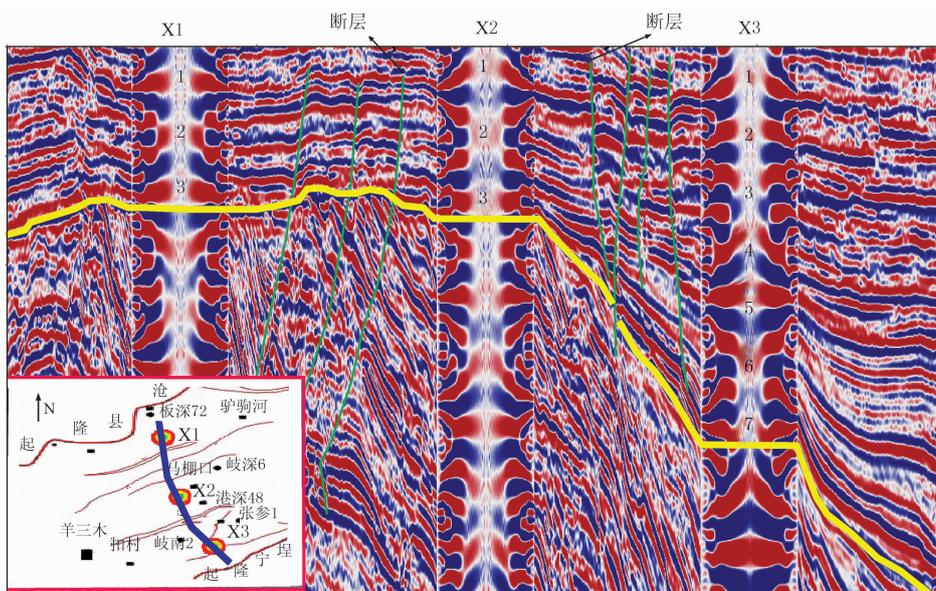


图 6 井—震标定插入技术在大港油区 dg001 测线中的应用

该地震剖面从左到右分别插入 X1、X2、X3 三口井 128 尺度的深频剖面, X1 井深频剖面右边半显示、X3 井左半边显示、X2 井对称显示;黄色线为馆陶组底界面,绿色线为解释断层;黄色线上面, X1 井有 3 个红色频率谱能量团, X2 井也有 3 个红色频率谱能量团, X3 井有 7 个红色频率谱能量团,图中标注的黑色数字即为能量团。

通过对比图 5 和图 6 发现,利用不同尺度的深频剖面划分不同级别的旋回结构和层序单元,两幅图三口井划分的层序界面、叠置序列与同相轴是完全吻合的。验证了方法的有效性和精确性。

5 结论

(1) 研制小波深频分析方法实现了将复杂信号分解为不同频率的单信号,每个单信号的频谱能量团旋回反映了一定级别的沉积层序旋回。

(2) 数值模拟出 5 个米氏周期旋回的单信号及复合信号,提取出单信号及复合信号的频谱旋回特征,建立了不同频率的频谱旋回对应刻度不同级别的沉积层序旋回的模式及代表(地质)意义,得出频谱旋回的类型、界面及个数与沉积层序旋回的类型、界面及个数一一对应,真正实现了用数学和地球物理语言刻画沉积层序旋回,为井—震标定联合解释奠定理论及应用基础。

(3) 井—震标定技术把井筒信息直接插入到地震剖面中,实现了把深频剖面插入到地震剖面中,通过井—震标定,完成了不同级别沉积层序旋回结构、层序单元、层序界面及叠置序列的识别划分及横向延拓性对比,实现了真正意义上的井—震标定联合解释。

参 考 文 献

- [1] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High frequency sequences and their stacking patterns: sequence stratigraphic evidence of high frequency eustatic cycles. *Sedimentary Geology*, 1991, 70(2~4): 131~160
- [2] 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. *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. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 93~95
- [3] Rudman A J, Lankston R W. Stratigraphic correlation of well logs by computer techniques. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(3): 577~588
- [4] Goldhammer R K, Lehmann P J, Dunn P A. The origin of high frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician EL PASO GP, West Texas): constraints from outcrop date and stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentational Petrology*, 1993, 63(3): 318~359
- [5] John H D. Geologic log analysis using computer methods. *AAPG*, 1994, 2(1): 150~169
- [6] Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Deposition cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from alpine triassic platform carbonates. *Geological Society of America*, 1990, 102(5): 535~562
- [7] 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. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(5): 1~5
Xu Jingling, Wang Guiwen, Liu Luofu. Study of sedimentary reservoir cycles using wavelet depth-frequency analysis method. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(5): 1~5
- [8] 杨勇强,邱隆伟,陈世阅等. 基于小波能量谱系图及小波曲线的层序地层划分. *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. *OGP*, 2011, 46(5): 783~789
- [9] 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. *AAPG, Methods in Exploration Series*, 1990, 7: 1~55
- [10] Berger A. Milankovitch theory and climate. *Rev Geophys*, 1988, 26(4): 624~657
- [11] Kemp F. An algorithm for the stratigraphic correlation of well logs. *Mathematical Geology*, 1982, 14(3): 271~285
- [12] Shanley K W, Maccable P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 544~568
- [13] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequence in basin analysis-architecture and genetics of flooding surface bounded depositional units. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(2): 125~142
- [14] 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. *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. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 249~255

(本文编辑:冯杏芝)