

文章编号: 1009-3850(2010)01-0054-07

地震沉积学研究方法评析

陈旭^{1,2}, 陈红汉^{1,2}, 董玉文³, 蔡李梅^{1,2}

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074; 3. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北荆州 434023)

摘要: 笔者在前人研究的基础上, 对地震沉积学的理论、研究现状和发展趋势进行了较为全面的阐述, 并对地震沉积学的关键技术问题进行了较深入的讨论。地层切片是应用沿两个等时界面间等比例内插出的一系列层面进行沉积体系和沉积相平面展布研究的技术; 90°相位转换(调整)使地震相位具有了岩性地层意义, 可以用于高频层序地层的解释; 基于不同频率地震资料反映的地质信息的不同, 采用分频段解释的方法, 可使地震结果的解释更加明确。由于受地震分辨率和解释手段的限制, 地震沉积学的研究目前还存在诸多问题, 但是作为一门新兴学科, 它已成为隐蔽油气藏勘探的一个突破口。

关键词: 地震沉积学; 地层切片; 分频技术; 90°相位转换
中图分类号: P512.2 **文献标识码:** A

1 前言

得益于地球物理技术的发展及其在石油地质研究中的广泛应用, 地震沉积学已成为继地震地层学和层序地层学之后的又一门新兴学科。地震沉积学建立在地球物理学、沉积学、地震地层学及层序地层学等学科的基础上, 主要利用三维地震信息和现代地球物理技术进行沉积体系、沉积相平面展布以及沉积发育史的研究。地震沉积学强调在高精度等时对比层序地层格架的基础上, 利用地震资料的横向分辨率高和特殊处理技术(地层切片、90°相位转换、分频段技术等), 结合关键井岩性资料以及不同成因类型砂体的地貌形态, 恢复沉积类型和沉积演化历史^[1]。随着石油勘探从构造油气藏向隐蔽油气藏的战略转变, 隐蔽油气藏已经成为我国油气勘探的一个重要方向。在隐蔽油气藏勘探中, 油气储集体的研究更显突出。新兴的地震沉积学对储集体的

内幕结构分析已经成为隐蔽油气藏勘探研究的一个主要突破口。

国内外学者应用地震沉积学进行新一轮的油气预测已取得了良好的效果, 证明了该方法的合理性和实用性, 显示了该新兴学科巨大的生命力^[2-5]。然而, 作为一门新兴的边缘学科, 地震沉积学的技术方法目前尚存在一些问题。本文在吸收消化前人研究的基础上, 对地震沉积学的理论、研究现状和发展趋势进行了阐述, 并对地震沉积学的关键技术进行了较为深入的讨论。

2 地震沉积学概述

2.1 地震沉积学的由来

在地震沉积学出现之前, 利用地震资料进行沉积研究和岩性识别已经得到了广泛的使用。1981年, BROWN等在利用暹罗湾三维地震资料进行地层解释的过程中, 就提出了基于三维地震水平切片进

收稿日期: 2009-05-18 改回日期: 2009-12-22

作者简介: 陈旭(1987-), 男, 硕士研究生, 专业方向为地震地质综合解释研究
资助项目: 中国地质大学研究生学术探索与创新基金(NQUGYJ0802)

行沉积相解释的理论^[9]。1998年,曾洪流等人发表了关于利用地震资料制作地层切片的论文,首次使用地震沉积学一词,标志着地震沉积学的诞生^[7]。2001年,曾洪流等正式提出地震沉积学是利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科^[8]。2004年,Eberl等人认为地震沉积学是基于高精度地震资料、现代沉积环境和露头古沉积环境模式的联合反馈来识别沉积单元三维几何形态、内部结构和沉积过程的一门新兴学科^[9]。2005年2月,地震沉积学国际会议在美国休斯顿的召开,标志着这门学科的发展进入了一个新的阶段。

2.2 地震沉积学的内涵和外延

地质记录是沉积环境的响应,而从地震资料所获得的信息又是地质记录的响应。所以,从地震记录可以间接地反映和反演出地质记录。随着现代地震技术的发展,还可以从地震记录中获得沉积单元的岩性、岩相、几何形态以及内部结构等沉积学及沉积岩石学方面的信息^[10]。这是地震勘探技术用于沉积学研究并能与沉积学联姻而形成地震沉积学的理论基础与前提。

地震沉积学既继承了沉积学、地震地层学和层序地层学的思想与基础,又脱胎于这些学科,有更深刻的内涵和更广的外延。从理论来看,地震反演和属性技术等地震资料处理与层序地层学和沉积学结合,用以研究等时地层格架内的沉积相问题,产生了地震沉积学。从现实来看,用客观定量的高精度地震属性计算进行沉积相划分和储层分析,是岩性油气藏勘探的现实需求。因此,对地震信息的定量计算和提取分析是地震沉积学研究的关键。地震沉积学的研究方法包括常规的地震等时地层格架的解释和建立,但更侧重于地震信息的定量处理和提取,如地震属性提取和地震反演等技术和方法,目的就是应用定量的地震信息,对建立的等时地层格架内的地层进行沉积信息的客观反映和沉积相的解释和分析。从研究内容来看,地震沉积学主要是在地质规律(尤其是沉积环境及不同沉积环境下沉积相模式)的指导下,利用地震信息和现代地球物理技术进行沉积史、沉积结构、沉积体系和沉积相平面展布的研究,即体现了从宏观到微观的不同尺度与层面上的高精度地震技术与沉积研究的结合(图1)。从研究方法来看,地震沉积学是在钻井和测井资料及基础地质研究成果指导下更多地运用地震资料的研究方法,目前采用的关键技术主要包括90°相位转换、地层切片和分频技术等。相比之下,层序地层学

属于地震沉积学的一个特例或低级别等时格架内的地震沉积学研究^[11,12]。

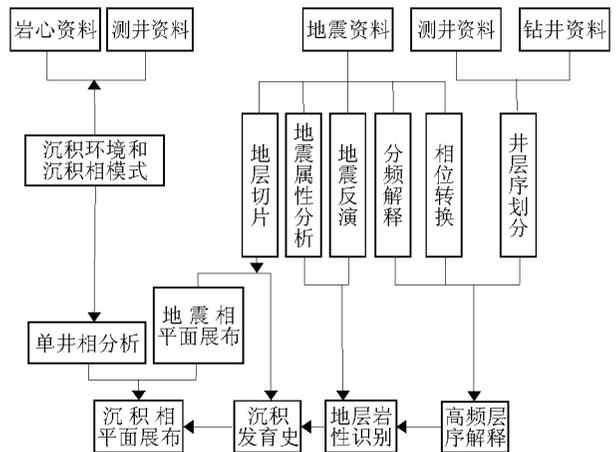


图1 地震沉积学研究思路流程(据董春梅,2006)

Fig 1 Flow chart showing the proposed methods of seismic sedimentology (after Dong Chunmei, 2006)

李思田教授将地震沉积学的内涵概括为:基于高精度的地震资料、现代沉积环境和露头古沉积环境模式的联合反馈,以识别沉积单元的三维几何形态、内部结构和沉积过程^[13]。也就是说,地震沉积学是一门地球物理学与沉积学相融合的交叉学科,它以地震技术为辅助手段,将地球物理与沉积学结合起来,优势互补,并对各自所得到的信息相互印证、互动反馈及综合分析,从而实现了对地质过程的准确全面的认识。地震沉积学要求研究人员既要掌握地质知识,又需要掌握地球物理资料处理解释方面的知识和方法。

3 地震沉积学的主要方法体系

地震沉积学还处于探索和发展阶段,目前应用最多的是地层切片、90°相位转换和分频技术等。

3.1 地层切片

1. 地层切片实现步骤

地层切片通过追踪两个等时沉积界面,在顶底间等比例地内插出一系列的层位,再沿这些内插出的层位逐一生成切片。尽管等时地层切片的实现涉及到修改原始地震数据体,但在工作站上实现还是较容易的。从理论上讲,任何三维地震解释系统均可实现,步骤主要为^[14]:①选择地质时间相同的地震参考层。其中,关键是要确定所选的层位必须是等地质时间的。在通常情况下,一般选择海相地层的最大洪泛面或陆相地层的最大湖泛面。同时,在

取参考层时,一定要注意断层、冲刷面、角度不整合等。为了减少拾取参考层的错误,要尽可能地多选参考层;②地层时间模型的建立。参考层一旦拾取,就要在期间运用线性内插函数,建立一个接近真实地层时间的构造模型。在所建的模型体中,每个时间切片上记录的双程旅行时保留了相应反射强度地层切片的构造信息,其在原始 3D 资料与反射强度地层切片体之间起到了一个桥梁作用;③建立地层切片体。在地层时间模型中,从原始 3D 地震体的每个地层面(时间切片)上提取反射强度,形成一个反射强度地层切片体。这相当于根据地层时间模型伸长或缩短地震道的时间,从而形成一个新的 3D 地震体,其地震道具有相同的数据长度或“厚度”。在地层切片体上,所有的参考同相轴都被拉平。因此,根据该地震体制作的所有地层切片,都代表了地层时间模型中来自相应的相对地质时间面的地震响应。

从准噶尔盆地车排子地区的滩坝砂可以看到^[15-16],在超覆斜坡带和滩坝砂发育的位置,利用切片进行高频层序内的滩坝砂体研究时,仅从层序

界面或某个同相轴上下沿层切片,其位置往往穿越同相轴,不能切过滩坝砂体,因此不能真正刻画滩坝砂体的平面分布。而地层切片采用等比例内插的方法,其切片位置与反射同相轴更加吻合,因而更接近于等时界面。沿初始湖泛面向上切片才能真正刻画出初始湖平面沿岸超覆退积分布的滩坝砂体(图 2)。因此,赋予地质含义的切片的综合属性分析技术,不仅可最大限度地识别并刻画沉积砂体的时空分布,而且可证实砂体的物源方向(图 3)。

2 三维地震属性切片的比较

给出时间切片 (time slicing)、沿层切片 (horizontal slicing) 和地层切片 (stratal slicing) 3 种地震属性切片提取方式的差异,结合高分辨率层序地层学的有关理论,可以对地层切片的提取方式进行技术探讨(图 4)。

时间切片是沿某一固定地震旅行时对地震数据体进行切片显示(图 4a)。切片方向沿垂直于时间轴的方向^[8],此方法适用于席状平卧地层,可辅助地层岩性解释和沉积相的解释,但应用条件十分苛刻,实际地震数据几乎难于满足要求。沿层切片沿

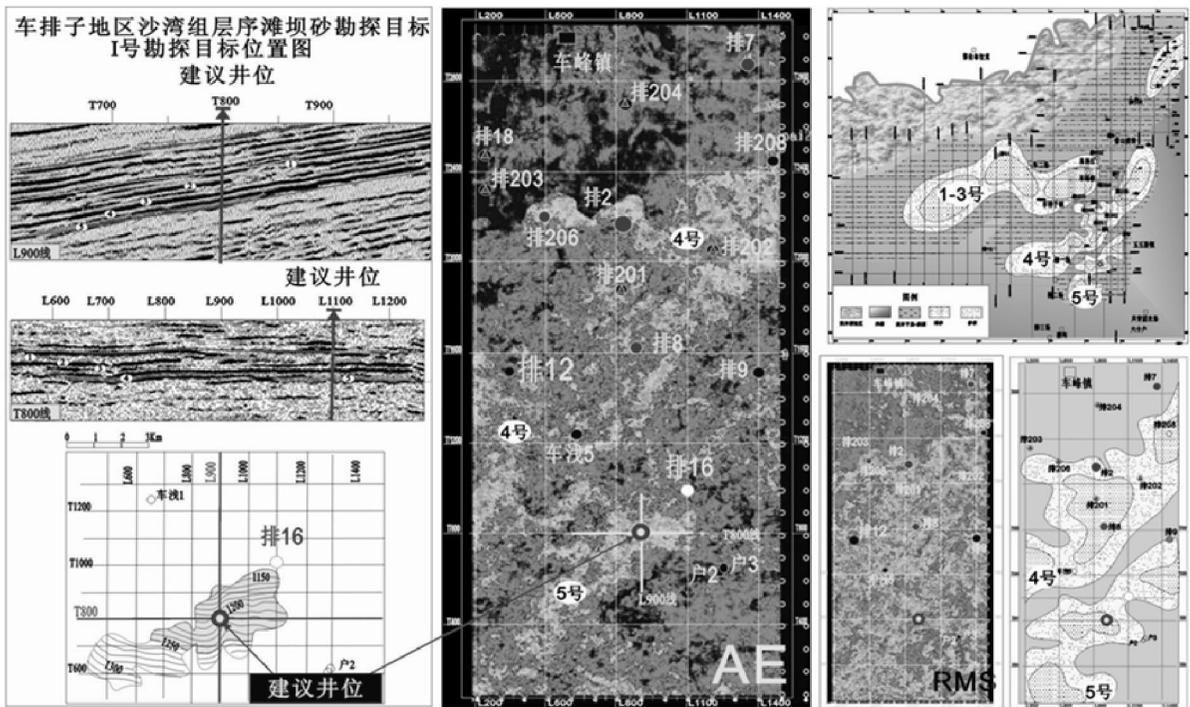


图 2 准噶尔盆地湖扩滩坝砂储层精细解释和多属性预测图 (据陆永潮等, 2008)

1 滩坝砂; 2 滨湖相; 3 浅湖相; 4 滨岸平原; 5 滨湖边缘; 6 山前边缘; 7 钻孔

Fig 2 Interpretation and forecasting of the beach-bar sandstone reservoirs in the Junggar Basin (after Lu Yongchao et al, 2008)
1= beach-bar sandstone 2= littoral lake facies 3= shallow lake facies 4= littoral plain 5= littoral lake margin 6= Piedmont margin 7= borehole

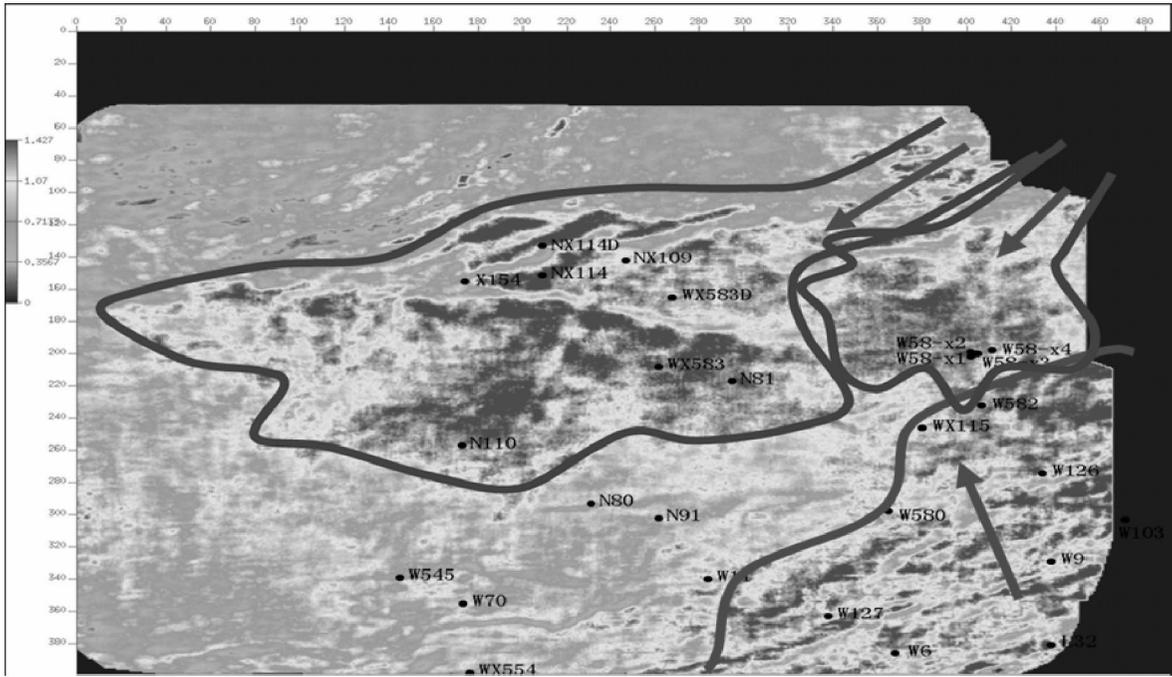


图 3 东营凹陷沙四段储层多属性最佳优化结果(据陆永潮等, 2008)

Fig 3 Optimization of multiple attributes of the sandstone reservoirs from the fourth members of the Shahejie Formation in the Dongying depression (after Lu Yongchao et al., 2008)

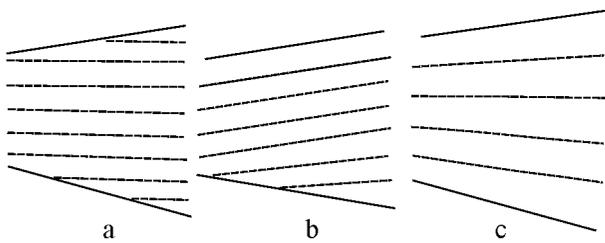


图 4 3D地震属性切片的比较

a 时间切片; b 沿层切片; c 地层切片

Fig 4 Comparison of 3D slicing of seismic attributes

a Time slicing; b Horizontal slicing; c Stratigraphic slicing

某一个没有极性变化的反射界面,即沿着或平行于追踪地震同相轴所得的层位进行切片(图 4 b),此方法适用于席状但非平卧的地层。实际地震资料研究中常以非席状且非平卧状地层为主,所以应用地层切片更接近于等时意义^[7]。如果在层序地层学解释过程中仅仅解释了层序边界这样一些主要地质界面,那么年代地层框架的精度(等时界面的时间跨度)就不能满足生成地层切片的需要。但是,沿层切片仍然是属性切片的主要手段。地层切片技术选取两条具有等时对比意义的地震参考同相轴,在其间按线性比例内插产生一系列切片(图 4 c),这种方法产生的切片能容易地拾取振幅型或结构异常型沉

积体系^[1],对河流、三角洲砂体的识别吻合性较高^[18]。同一地质时期沉积的地层厚度的变化往往与沉积物体积分配作用和相异作用有关,而地震沉积学正是研究地层的沉积演化规律的,故遵循这个规律提取的地层切片体对地震沉积学的研究至关重要。通过地层切片,部分地克服了时间切片和沿层切片的缺点,简化了沉积特征在沉积面上的地震映射,使沉积相成图工作变得比较简单,并有效解决了穿时问题。

3 存在问题探讨

地层切片的原理假设相邻切片间的沉积地层单元厚度达到了地震可分辨的尺度,另外还假设沉积速率与沉积厚度在平面上成正比,且两个等时的沉积地层界面间的沉积速率在垂向上不随时间变化。所以,用地层切片研究沉积相的方法并没有解决地震纵向分辨率限制的问题。对于薄的互层地层来说,地震反射同相轴实际上是一系列薄互层的综合响应,所以并不是两个等时界面间的每一个等比例内插层面都对应一个等时沉积界面。因此,对于薄互层而言,利用地层切片进行沉积相研究时,地层切片的纵向密度并不是越密越好,对厚度小于地震纵向分辨率的薄层来说,地层切片显示的信息并不一定是该地质时间单元内发育的沉积相的反映。另

外,事实上沉积速率受到沉积物供应速率、可容空间变化等因素的影响,而沉积物供应速率、可容空间变化等在构造运动、古气候变化等的影响下随时间不断变化。任何地质过程都是包含时间变量的多元函数,对于某一个具体的平面位置上的点来说,它所处的构造部位和沉积环境是随着时间不断变化的,所以其沉积速率是随时间变化的,而且在很多情况下这种变化的影响是不容忽略的^[19,20]。因此,地震沉积学还处于初期发展阶段,在实际应用中需结合其它地质资料进行综合分析,以期得到客观合理的结果。

3.2 90°相位转换

1. 相位转换原理

我们知道,波形和测量振幅是地震相位谱的函数。常规地震处理一般都进行子波零相位化处理。零相位数据体在解释中具有子波的对称性、主瓣中心(最大振幅)与反射界面一致以及较高的分辨率等优点。但是,只有当地震反射来自一个单一的界面(如海底、主要不整合面、厚层块状砂岩的顶面等)时,零相位地震数据的上述优点才能够显示^[1]。而且,零相位地震数据中,波峰、波谷对应地层界面,岩性地层与地震相位间不存在必然的关系,要建立地震数据和岩性测井曲线间的对应关系较困难,特别是陆相沉积中,储集层往往较薄,连续性差,相带窄,且空间变化大^[21,22]。对薄层而言,反射振幅是

组合地震响应,它混合了来自薄层顶底的反射,砂体与地震同相轴之间也没有直接的对应关系,因此零相位地震数据不适合于薄层砂体的解释。90°相位转换通过将地震相位旋转90°,将反射波主瓣提到薄层中心,从而克服了零相位波的缺点。地震反射相对于砂岩层对称而不是相对于地层顶底界面对称,这使得地震反射的同相轴与岩层对应,地震相位也就具有了岩性地层意义,使地震道近似于波阻抗剖面,提高了剖面的可解释性^[23,24]。图5是秘鲁S油田的一个例子,从图中可以看到,转换后地层界面的位置由蓝轴(正相位)内转换到了零相位的位置,在层位追踪时减小了视觉误差造成的层位拾取位置的误差,而且地震相位与岩性测井曲线更加吻合,使地震相位具有了岩性地层意义^[19]。

2. 相位转换讨论

对地震资料进行90°相位转换,实质上就是对地震数据进行简单的道积分处理,从而使得在相位转换后,地震振幅具有一定的岩性地层意义。如果我们使用地震纵波阻抗数据体或地震弹性阻抗数据体,因这些数据本身就是等时界面之间的岩石物理特征的反映,如果进行90°相位转换,那么数据体意义变得模糊。另外,90°相位转换并没有提高地震资料的分辨率,只是使地震相位具有了地层意义^[19]。从相位转换的方法本身来说,笔者认为不应仅局限于90°相位转换。相位转换的目的是赋予地震相位

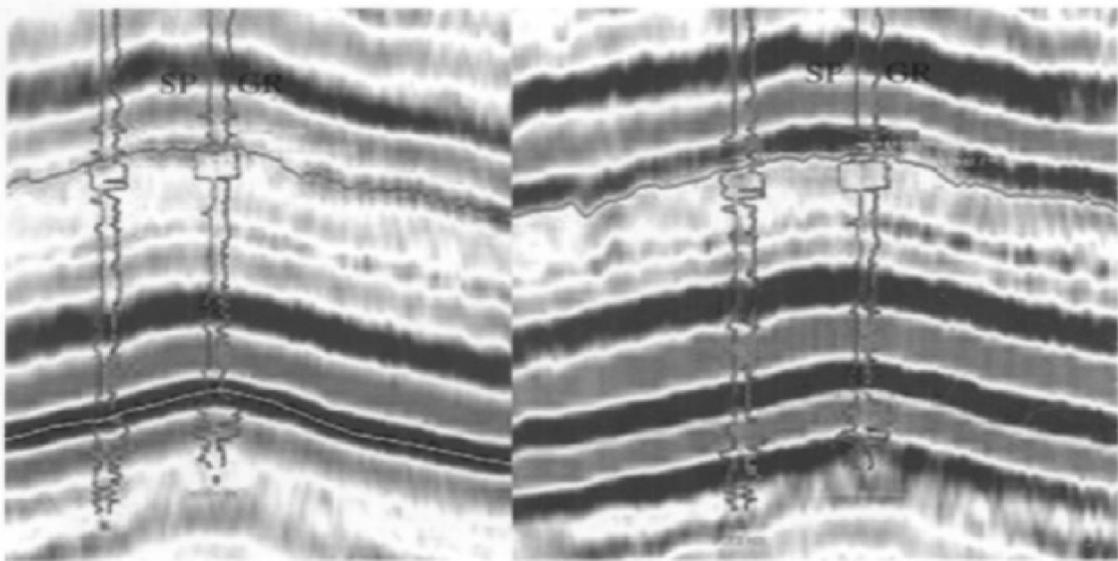


图5 90°相位转换前后测井曲线与地震同相轴对应关系的对比(秘鲁S油田)(引自林承焰等,2006)

Fig 5 Relationship between well logs and seismic events before and after 90° Phasing in S oil field, Peru (after Lin Chengyan et al., 2006)

以地层的意义,所以具体转换角度要根据标定后测井分层上目的层位对应的地震相位来决定。如经过标定某四级层序界面对应 45° 相位,那么在解释这个层面时就需要尝试将相位调整 45° ,使其层面对应于零相位,这样才能达到通过相位转换赋予相位以地层意义的目的^[19]。另外,把地震数据进行非 90° 的相位转换时,地震子波实际上会发生畸变(不具备共轭对称的特点),使原有的地震振幅也发生一定变化,因而地震振幅反映的地层岩性情况就不一定准确,所以实际运用中要慎重。

3.3 分频解释技术

地震沉积学最大的理论突破在于对地震同相轴穿时性的重新认识。Vai等指出:“在自然界中,不存地震反射平行于岩性地层单元顶面的物理界面”^[25]。曾洪流和 Charles Kerans在 Permian盆地 Kingdom Abo储层研究中发现,在前积的碳酸盐岩台地边缘和斜坡沉积中,主反射同相轴并不沿倾斜的地质时间界面^[29]。实际应用的地震资料的主频一般在 35Hz 以下,有些深层资料甚至低于 20Hz ,所以对于实际使用的地震资料而言,在岩性界面(或岩石物理界面)与沉积时间界面相交时,反射同相轴是穿时的。研究认为,低频地震资料中的反射同相轴更多地反映岩性界面信息,而高频资料中的同相轴更多地反映时间界面信息。基于这一认识,采用分频解释的方法,针对不同的地质目的使用不同频段的地震数据。地震沉积学中使用的分频解释是基于地震资料的频率成分控制了地震反射同相轴的倾角和内部反射结构这一认识,即:

$$\xi(X) = W(X) \times G(X) \quad (1)$$

式中: $X=2\pi \cdot f$ 为频率; $W(X)$ 为子波频谱; $G(X)$ 为测井资料得出的反射系数频谱; $\xi(X)$ 为地震频谱。按照褶积理论,地震道是声阻抗剖面中反射系数序列与地震子波褶积的结果。根据傅里叶法则,这一过程在频率域中等价于子波频谱和反射系数序列频谱的乘积^[11]。

地震资料中连续的频率变化本身蕴含了丰富的地质信息,不同级别的地质层序体对应着地震剖面上的不同频率特征,仅采用分频解释方法还不能将这类信息充分利用起来,而时频分析方法恰好弥补了这一缺陷。时频分析即频率时间扫描通过快速傅里叶变换将时间域的地震记录转化到频率域,利用时频分析技术按不同频率进行扫描分析,可以识别出由大到小的各级层序体,从而得到一些地震剖面上没有的信息。由于纵向上频率变化的方向性代表

了岩性粗细的变化,所以时频分析不但可以用于地层层序解释,还可以用于划分沉积旋回和推断水体变化规律及沉积环境变化。因此在地震沉积学的研究中,分频解释应与时频分析技术应结合使用^[15,16]。

参考文献:

- [1] ZENG HONGLI, HENTZ T F High frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology applied to Miocene Vermilion Block 50, Tiger Shoal area offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 153-174.
- [2] 林承焰,张宪国,董春梅.地震沉积学及其初步应用[J].石油学报,2007,25(2):69-73.
- [3] 吴国业,顾家裕,施和生,等.从层序地层学到地震地层学—全国第五届油气层序地层学大会综述[J].石油实验地质,2008,30(3):218-222.
- [4] 刘保国,刘力辉.实用地震沉积学在沉积相分析中的应用[J].石油物探,2008,47(3):265-271.
- [5] 石万忠,孔敏,宋志峰.伊通盆地梁家地区奢岭组混源扇三角洲内幕结构[J].地球科学—中国地质大学学报,2008,33(3):365-370.
- [6] BROWN A R, DAHM C G, GRAEBNER R J A stratigraphic case history using three dimensional seismic data in the Gulf of Thailand [J]. Geophysical Prospecting, 1981, 29(3): 327-349.
- [7] ZENG HONGLI, BACKUS M M, BARROW K T et al. Stratal slicing Part I: Realistic 3D seismic model [J]. Geophysics, 1998, 63(2): 502-513.
- [8] ZENG HONGLI, HENTZ T F, WOOD L J. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in Vermilion Block 502, Tiger Shoal area, offshore Louisiana [J]. The Leading Edge, 2001, 20(4): 408-418.
- [9] EBERLIG P, MASAFERRO J L, RICK S J F. Seismic imaging of carbonate reservoirs and system [C]. Tulsa: AAPG Housing Bureau, 2004: 129.
- [10] 王正和,蒋能春,吕其彪.地震沉积学的概念、方法和应用[J].江汉石油科技,2008,18(2):7-11.
- [11] 董春梅,张宪国,林承焰.地震沉积学的概念、方法和技术[J].沉积学报,2006,24(5):698-704.
- [12] 董春梅,张宪国,林承焰.有关地震沉积学若干问题的探讨[J].石油地球物理勘探,2006,41(4):405-409.
- [13] 王正和,蒋能春,吕其彪.地震沉积学概念、方法及其应用研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2008,10(3):24-27.
- [14] 郭海洋,巫芙蓉.地震沉积学在GA地区的初步应用[J].物探化探技术,2008,30(5):102-105.
- [15] 王华,陆永潮,任建业,等.层序地层学基本原理、方法与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2008.
- [16] 陆永潮,杜学斌,陈平,等.油气精细勘探的主要方法体系—地震沉积学研究[J].石油实验地质,2008,30(1):1-5.

- [17] ZENG HONGLIU, BACKUS M M, BARROW K T et al. Facies mapping from three dimensional seismic data: Potential and guidelines from a Tertiary sandstone shale sequence model Powderhorn Field, Calloun County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80 (1): 16—46
- [18] 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.
- [19] 林承焰, 张宪国. 地震沉积学探讨[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1140—1144.
- [20] 魏嘉, 朱文斌. 地震沉积学—地震解释的新思路及沉积研究的新工具[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(2): 91—102.
- [21] 林吉祥, 施泽进, 凌云, 等. 利用基本地震属性对目标层段的沉积演化解释研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(2): 174—179
- [22] 张延章. 地震微相分析技术在大港滩海探区的应用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 58260
- [23] ZENG HONGLIU, BACKUS M M. Interpretive advantages of 90° Phase wavelets Part 1—Modeling[J]. Geophysics, 2005, 70(1): 7—15
- [24] ZENG HONGLIU, BACKUS M M. Interpretive advantages of 90° Phase wavelets Part 2—Seismic applications[J]. Geophysics, 2005, 70(1): 17—24
- [25] ZENG HONGLIU, KERANS C. Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: A case study of the Kingdom Abo sequence west Texas[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(2): 273—293

Methods and application of seismic sedimentology: An overview

CHEN Xu^{1, 2}, CHEN Honghan², DONG Yuwei¹, CAI Limei²

(1. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

Abstract The present paper gives a general view of theory, current state, future development and key techniques of seismic sedimentology. The technique of stratal slicing is proposed to be applied to the study of the planar distribution of sedimentary systems and sedimentary facies. The technique of 90° Phasing may provide the high-frequency sequence stratigraphic interpretation. As a rising discipline, the seismic sedimentology will make a breakthrough in the exploration of subtle hydrocarbon reservoirs.

Key words seismic sedimentology, stratal slicing, frequency decomposing, 90° Phasing of seismic data