

文章编号: 1000-0550(2006)05-0698-07

地震沉积学的概念、方法和技术^①

董春梅 张宪国 林承焰

(中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要 简单地讲,地震沉积学是应用地震信息研究沉积岩及其形成过程的学科,它是继地震地层学、层序地层学之后的又一门新的边缘交叉学科。其研究内容、方法和技术与地震地层学、层序地层学和沉积学等其他学科都有所不同,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。但它是沉积学的发展而不是替代,地震沉积学研究要以地质研究为基础,在沉积学规律的指导下进行。90°相位转换、地层切片和分频解释是地震沉积学中的三项关键技术。相位转换使地震相位具有了地层意义,可以用于高频层序地层的地震解释;地层切片是沿两个等时界面间等比例内插出的一系列层面进行切片来研究沉积体系和沉积相平面展布的技术;基于不同频率地震资料反映地质信息不同,采用分频解释的方法,使得地震解释结果的地质意义更加明确。

关键词 地震沉积学 穿时性 90° 相位转换 地层切片 分频解释

第一作者简介 董春梅 女 1963年出生 副教授 博士 沉积岩石学及储层地质学
中图分类号 P65 P512.2 **文献标识码** A

2005年2月,地震沉积学国际会议在美国休斯敦召开,继地震地层学、层序地层学之后,地震沉积学作为一门新的学科越来越受到人们的关注。国外上世纪80年代开始出现地震沉积学这个名词,但由于地震分辨率和研究手段的限制,没有形成一套系统的理论体系和完整的学科,国内近几年虽然广泛开展利用地震资料进行沉积相、地层岩性识别的研究,但还没有出现有关地震沉积学的系统研究。本文对这门新学科的有关概念、主要方法和关键技术进行阐述。

1 有关地震沉积学的概念

在墨西哥湾北部中新世地层Tiger浅滩地区高频层序研究中,曾洪流等人研究发现,四级层序的地震响应是一系列沉积界面的组合,包括层序顶底及在地震剖面上难以识别的内部界面^[1],常用的地震剖面简单追踪的方法已经不能划分这样的四级层序边界和体系域了。针对这种情况,曾洪流等人提出了基于地震沉积学的高频层序解释方法:首先在平面上分析低级层序(二、三级层序)地层格架中高分辨率沉积要素;然后在垂向上和三维视图中研究高频层序地层背景^[1]。

1998年曾洪流, Henry Riola等首次使用了“地震沉积学”一词^[2],认为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^[3]。地震岩

石学和地震地貌学组成了地震沉积学的核心内容^[1]。将地球物理技术与沉积学研究相结合,二者联合反馈进行沉积相分析是近几年地震沉积学应用领域中推广最快的一项技术,但这只是地震沉积学应用的一个方面。地震沉积学与地震地层学、层序地层学、沉积学等学科相关,但是在概念、研究内容、方法技术等方面都有所不同。

从研究内容上看,沉积学的研究范围从微观的岩石孔隙结构、成岩作用等到宏观的沉积相和沉积体系展布,地震地层学主要通过地震同相轴的接触关系研究层序地层格架,而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地层岩石宏观研究、沉积史、沉积结构、沉积体系和沉积相平面展布的研究(图1)。

从研究方法技术上看,沉积学研究离不开对岩石的直接观察和实验分析^[4],在沉积岩的研究中通过镜下观察及各种实验手段对岩石进行微观层次上的研究是沉积岩研究的一个很重要的内容,对沉积环境的分析首先对野外露头或者岩心进行细致全面的观察描述,包括对岩性、沉积构造、古生物标志、地球化学标志等方面的全面描述。然后综合各种相标志,运用沉积学原理,对古沉积环境作出正确的解释^[5]。地震地层学主要是在井点信息的约束下研究地震剖

①教育部第二届高校优秀青年教师教学科研奖励基金资助。

收稿日期: 2005-12-29 收修修改稿日期: 2006-03-09

面上的反射结构样式,从中获取层序地层信息,它的研究手段和研究内容相对比较单一。地震沉积学在井资料、基础地质研究成果及地质规律指导下更多的

运用地震资料和地震的研究方法,目前采用的关键技术主要包括 90°相位转换技术、地层切片技术和分频解释技术等。

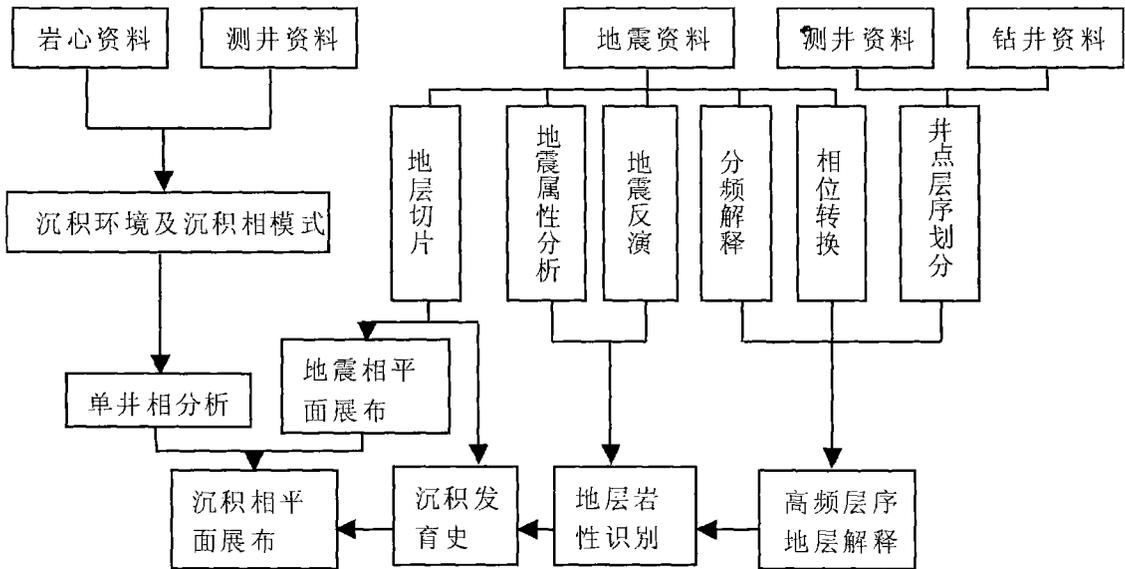


图 1 地震沉积学研究思路流程

Fig 1 The flowchart of seismic sedimentology research

2 地震沉积学对地震地层学理论基础的挑战

地震地层学是基于下面一个假设:沉积层序的地震反射是沿有明显声阻抗差的地层界面产生的,因为地层界面反映等时沉积界面,所以地震反射具有等时意义。Vail等指出“在自然界中,不存在形成的地震反射平行于岩性地层单元顶面的物理界面”^[6]。这一假设是地震地层学进行地震解释的基础。

曾洪流和 Charles Kerans在 Peman 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。通过对三角洲前积体中常见的平行倾斜界面模型进行正演的结果^[9](图 2)可以看到:用 60Hz 的雷克子波可以清晰的反映出等时沉积界面的形态(图 2a);子波频率 40Hz 时,等时沉积界面的地震反射同相轴开始出现合并(图 2b);当频率降低到 30Hz 时,地震同相轴形态已经不再反映等时沉积界面形态,而是与三角洲前积中的岩性界面形态一致(图 2c),可见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^[6]。低频地震资料中同相轴更倾向于具有岩性意义而不是时间意义。实际应用的资料的主频一般在 35Hz 以下,有些深层资

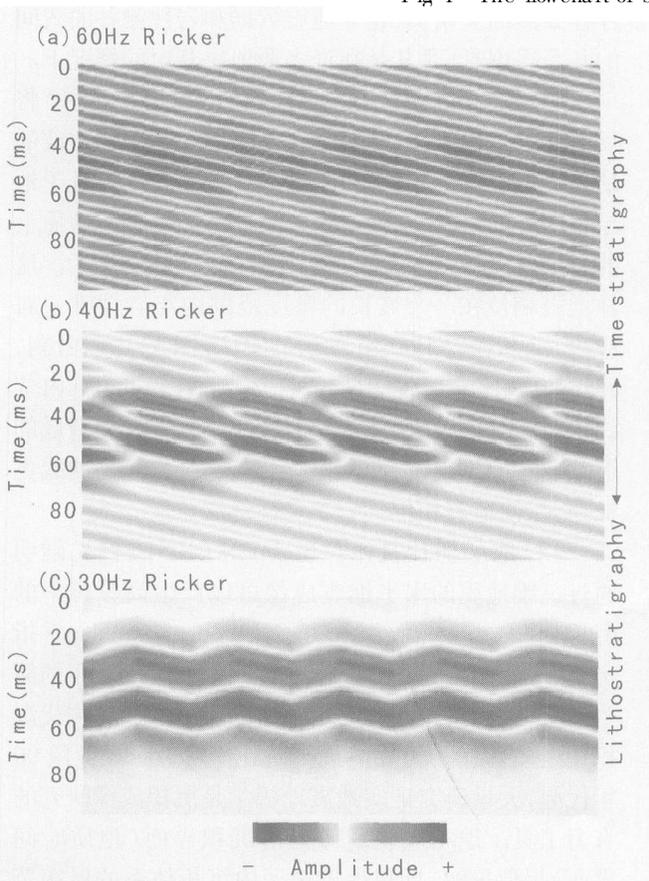


图 2 地震同相轴反射结构随频率变化的正演模型结果

Fig 2 The forward modeling result of the seismic reflection configuration varying with frequency

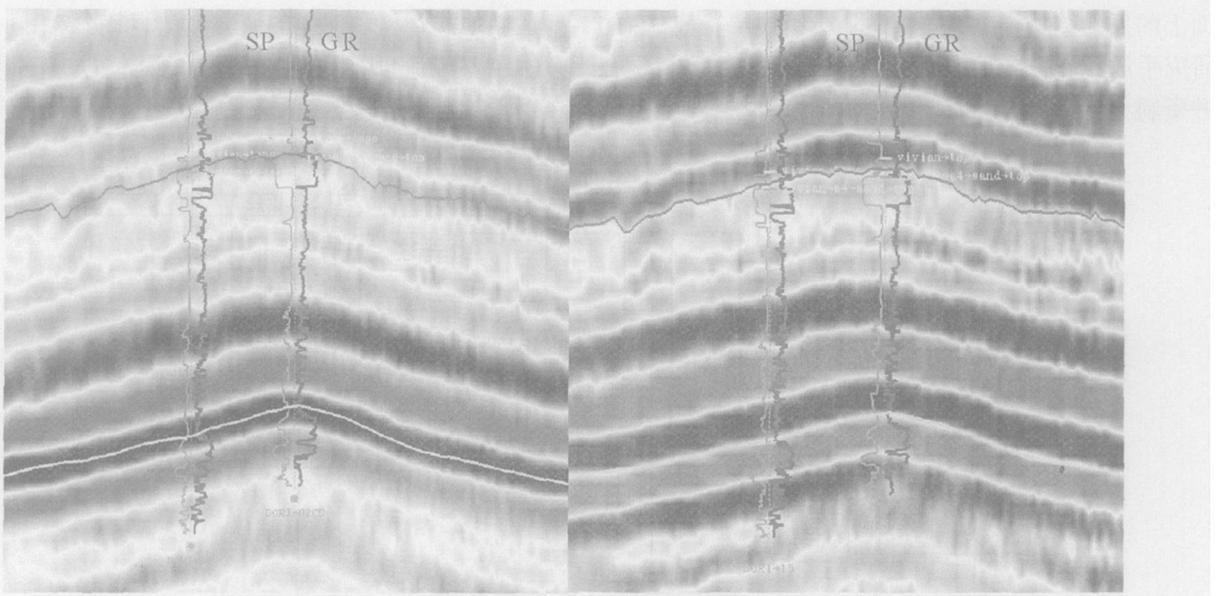


图 3 90°相位转换前后岩性测井与地震同相轴对应关系的对比(秘鲁 Dorissa 油田)

Fig 3 The comparison of the relationship between seismic events and log before and after the 90° phase conversion (Dorissa oil field in Peru)

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。这一观点否定了反射同相轴的严格等时性, 动摇了地震地层学的研究基础。

3 地震沉积学的研究方法和技术

目前提高地震地层解释精度的技术很多, 如 AVO 分析、波阻抗反演等, 但这些方法都是应用于储层预测研究的技术, 一般只有在复杂储层评价中才做这些高成本的处理^[1]; 这些处理方法都存在很大的不确定性, 必须依赖于地质认识(包括层序划分、沉积相等)及井资料的约束; 更重要的是这些处理都是基于岩性单元预测和含油气单元预测的, 最终的结果是对地层岩性和含油气性的反映, 并不能提供高频等时沉积界面信息。所以在地震沉积学研究中真正有意义的实用技术还比较少, 地震沉积学研究中的关键技术主要包括 90°相位转换技术、地层切片技术和频段解释技术。

(1) 90°相位转换技术。波形和测量振幅是地震相位谱的函数。标准的地震处理通常把零相位的地震数据体作为提供给解释者的最终结果。零相位数据体在地震解释中具有很多优点, 包括子波的对称性、主瓣中心(最大振幅)与反射界面一致以及较高的分辨率等。但是只有海底、主要不整合面、厚层块状砂岩顶面等单一反射界面得到的地震反射零相位数据才具有这些优点^[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联系很困难, 尤其是在许多薄地层互层的情况下。

90°相位转换的方法通过将地震相位旋转 90°将反射波主瓣提到薄层中心, 以此来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地质上的岩层对应, 地震相位也就具有了岩性地层意义。这样地震相位在一个波长的厚度范围内与岩性唯一对应^[7, 8]。从秘鲁 Dorissa 油田的实例(图 3)可以看到, 经过 90°相位转换后地层界面由蓝轴(正相位)内变到了零相位上, 在层位追踪时减小了视觉误差造成的追踪位置的不准确, 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。

(2) 地层切片技术。Brown 等(1981)首先阐明通过三维地震的水平地震成像可以产生高分辨率的沉积相图像^[9]。荷兰沉积学家 Wolfgang Schlager 指出, 三维地震提供了研究古代沉积形态平面展布的简单方法, 并将密西西比河三角洲的航拍照片与古代沉积在地震切片上的响应进行对比^[10]。自 20 世纪 90 年代起, 大量研究证实地震地貌学是沉积成像研究的有力工具。地震地貌成像是沿沉积界面(地质时间界面)提取振幅, 反映地震工区内沉积体系的展布范围。这样的地震切片称为地层切片, 这与 1996 年 Posamentier 提出的等比例切片^[11]比较类似。

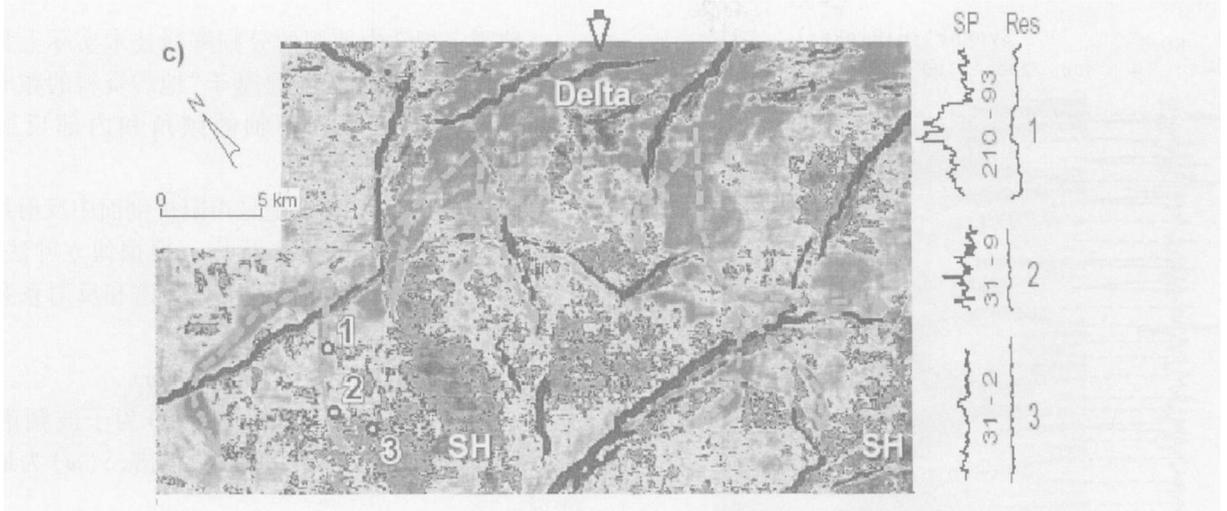


图 4 三角洲沉积体系在地层切片中的反映(据曾洪流, Hentz等, 2001)

Fig 4 The reflection of delta sediment system in strata slice
(after Zeng Hongliu Hentz *et al.*, 2001)

利用切片识别沉积相的关键有两个,一是通过单井沉积相来标定地震相,建立二者的联系;二是由单井相推断研究区沉积环境,并建立此沉积环境下的一般沉积相模式,在沉积相模式的指导下将地震振幅的平面响应转化成沉积相的平面展布。图 4是曾洪流等在 Tiger 沿岸地区 Vermilion 50 区块做的地层切片^[11],利用研究区内三口井井点位置的沉积相与地震振幅的关系建立起沉积相与地震相的对应关系,通过这种标定可以在切片中清楚地识别出中新统上部三角洲沉积体系的平面展布。

传统的切片方法包括等时切片和沿层切片(水平切片),在大多数解释软件(如 GeoFrame Landmark 的 Openworks Discovery 等)中都提供了相应的实现工具。等时切片(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,切片方向是沿垂直于时间轴的方向^[12];沿层切片(水平切片)是沿某

一个没有极性变化的反射界面的切片,它更倾向于具有地球物理意义^[13],即沿着或平行于追踪地震同相轴所得的层位进行切片;而地层切片则是以追踪的两个等时沉积界面为顶底,在顶底间等比例内插出一系列的层位,沿这些内插出的层位逐一生成切片。从胜利乐安油田的例子(图 5)中可以看到,地层切片技术考虑了沉积速率随平面位置的变化,比时间切片和沿层切片(水平切片)更加合理而且更接近于等时沉积界面^[14]。

(3)分频解释技术。地震沉积学与地震地层学的最大不同在于它认识到地震同相轴既不简单的反映等时界面也不单纯反映岩性界面,而是受到地震资料频率的控制^[6],不同频段的地震数据反映的地质信息是不同的。低频资料中反射同相轴更多的反映岩性界面信息而高频资料中反射同相轴更多的反映等时沉积界面信息(图 6)。

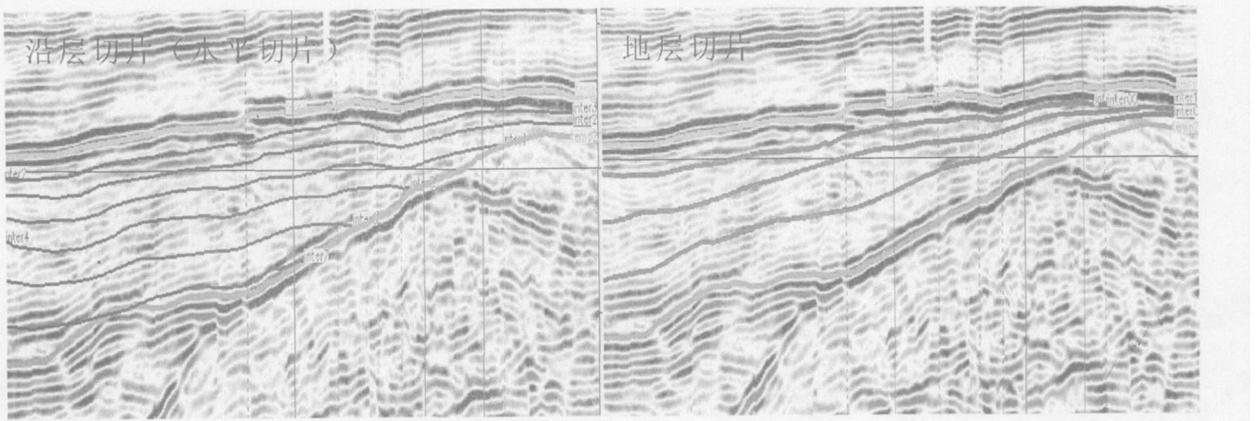


图 5 沿层切片与地层切片原理对比(胜利乐安油田)

Fig 5. The comparison of the concept between horizontal slice and strata slice (Shengli Le an oil field)

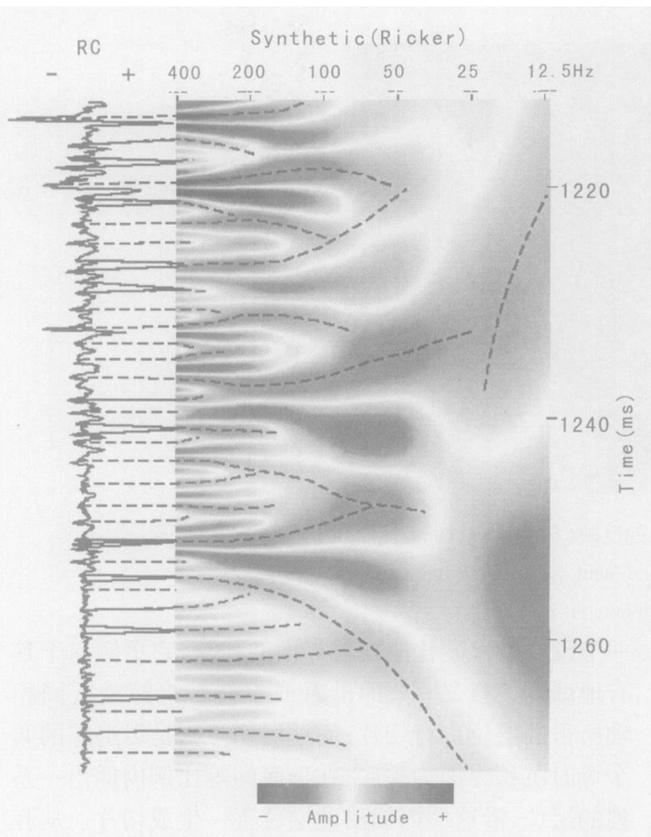


图6 地震数据纵向分辨能力随主频而变化
(据曾洪流, 2003)

Fig 6 The vertical resolving ability of seismic data varying with main frequency (after Zeng Hongliu, 2003)

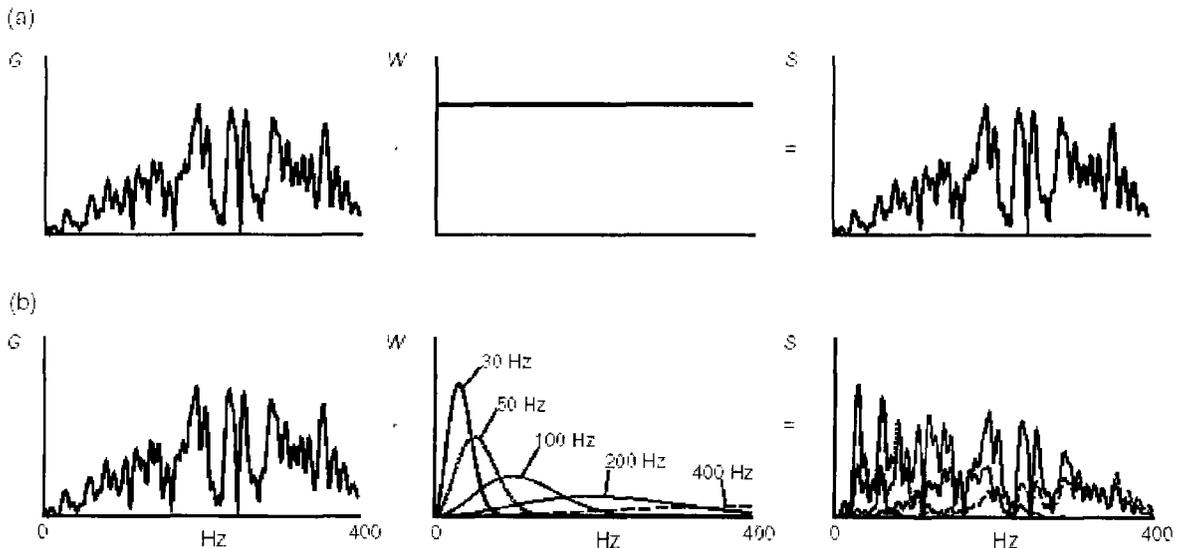


图7 反射系数频谱、子波谱和地震频谱间的关系
(据曾洪流, 2003)

Fig 7 The relationship of reflection coefficient frequency spectrum, wavelet spectrum and seismic frequency spectrum
(after Zeng Hongliu, 2003)

地震沉积学中使用的分频解释技术实际上是一种分频段解释的方法,它是基于“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”^[6]这一认识。

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^[15]。根据傅立叶法则,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褶积,见公式 1。

$$S(\omega) = W(\omega) \times G(\omega) \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ f 为频率, $W(\omega)$ 为子波频谱, $G(\omega)$ 为测井资料得出的反射系数频谱, $S(\omega)$ 为地震频谱。

从图 7 的比较可以看出地震资料中的高频成分与测井高频层序划分吻合的更好^[6]。因此,对地震资料进行分频处理,从原始地震资料中提取高、中、低不同频段信息经过振幅增益后,针对不同的需要选用相应频段的地震数据体,如利用高频数据体进行等时沉积界面解释等。通过上面的阐述不难发现,90°相位转换技术、地层切片技术、分频解释技术这三项地震沉积学的关键技术都是基于一点认识:地震反射同相轴不是严格等时的,其地质意义与地震资料的频率有关,当岩性界面与等时沉积界面相交时会发生反射同相轴穿时的现象。

4 结论

通过上述分析可以得到以下几点结论:

(1) 地震沉积学认为地震反射同相轴不是等时的,当岩性界面与等时沉积界面相交时会发生同相轴穿时现象。地震频率成分控制了反射同相轴的倾角和内部反射结构,低频地震资料中同相轴更倾向于具有岩性界面的意义而不是时间界面意义,这一认识动摇了地震地层学研究的前提假设,是地震沉积学最大的理论突破。

(2) 地震沉积学借助于地震手段进行井间沉积相和地层岩性预测,这代表了未来的发展方向;与地震地层学、层序地层学和沉积学相比较,它在概念、研究内容、研究方法技术上都有自己的特点。但它是沉积学的发展而不是替代,它强调要以基础地质研究和沉积学规律(尤其是不同沉积环境下的沉积相模式)为指导。

(3) 90°相位转换技术赋予了地震相位以地层意义,使岩性测井与地震同相轴间对应关系更加明确。

(4) 地层切片技术是传统切片技术的一大改进,它考虑了沉积速率的平面差异性,比时间切片和沿层切片(水平切片)更加具有等时性。

(5) 地震沉积学中的分频段解释技术是基于反射同相轴的穿时性以及地震频率对反射结构具有控制作用的认识而提出的。

致谢 本文的完成得益于和曾洪流博士的学术交流和讨论。

参考文献 (References)

- 1 Hongliu Zeng and Tucker F Hentz High frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: Applied to Miocene Vermilion Block 50 Tiger Shoal area offshore Louisiana AAPG Bulletin 2004 88(2): 153~174
- 2 Hongliu Zeng Stephen C Henry and John P Riola Stratal slicing part II Real 3-D seismic data Geophysics 1998 63(2): 514~522
- 3 Hongliu Zeng and William A. Ambrose Seismic sedimentology and re-

- gional depositional systems in Miocene North Lake Maracaibo Venezuela The Leading Edge 2001 11
- 4 Wolfgang Schlager The future of applied sedimentary geology. Journal of Sedimentary Research 2000 70(1): 2~9
- 5 黄锋,李志荣,廖玲,等.利用地震资料进行沉积相分析.物探化探计算技术,2003 25(3): 197~200 [Huang Feng Zhang Zhirong Liao Ling et al. Sedimentary facies analysis using seismic data. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration 2003 25(3): 197~200]
- 6 Hongliu Zeng and Charles Kerans Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: A case study of the Kingdom Abo sequence west Texas AAPG Bulletin 2003 87(2): 273~293
- 7 Hongliu Zeng and Mib M Backus Interpretive advantages of 90° phase wavelets Part I—Modeling Geophysics 2005 70 7~15
- 8 Hongliu Zeng and Mib M Backus Interpretive advantages of 90° phase wavelets Part 2—Seismic applications Geophysics 2005 70 17~24
- 9 Brown A R Dahm C G and Graebner R J A stratigraphic case history using three dimensional seismic data in the Gulf of Thailand. Geophysical Prospecting 1981 29(3): 327~349
- 10 Wolfgang Schlager The future of applied sedimentary geology. Journal of Sedimentary Research 2000 70(1): 2~9.
- 11 Posmentier H W, Dom G A Cole M J Beierle C W and Ross S P. Imaging elements of depositional systems with 3-D seismic data: A case study. Gulf Coast Section SEPM Foundation 17th Annual Research Conference 1996 213~228
- 12 Hongliu Zeng Tucker F Hentz and Lesli J Wood Stratal slicing of Miocene Pliocene sediments in Vermilion Block 50 Tiger Shoal Area offshore Louisiana The Leading Edge 2001 4
- 13 Hongliu Zeng and Mib M Backus Kenneth T Barrow et al. Facies Mapping from Three dimensional seismic data: Potential and guidelines from a Tertiary sandstone shale sequence model Powderhorn Field Calhoun County Texas AAPG Bulletin 1996 80 16~46
- 14 Hongliu Zeng Mib M Backus Kenneth T Barrow and Noel Tyler Stratal slicing part I Realistic 3D seismic model Geophysics 1998 63(2): 502~513
- 15 吴国忱,康仁华,印兴耀.三维时频分析方法在地震层序分析中的应用.石油大学学报(自然科学版),2000 24(1): 81~84 [Wu Guochen Kang Renhua Ying Xingyao The application of 3D time frequency analysis in seismic sequence analysis Journal of the University of Petroleum, China 2000 24(1): 81~84]

Conception Method and Technology of the Seismic Sedimentology

DONG Chun-mei ZHANG Xian-guo LIN Cheng-yan

(Earth Resource and Information College of University of Petroleum, Dongying Shandong 257061)

Abstract Seismic sedimentology is the use of seismic information to study sedimentary rocks and their forming processes. It is a new marginal interdisciplinary subject following seismic stratigraphy and sequence stratigraphy. It differs from seismic stratigraphy, sequence stratigraphy and sedimentology in its research contents, methods and technologies. The new knowledge of "seismic events go across time surfaces" is the most important innovation of this subject. But it is only a supplement, not a substitution of sedimentology. It should base on the geology research and under the principle of sedimentology. The technologies of 90° -phase inversion, stratal slicing and interpreting with frequency are the three key technologies. The method of 90° -phase inversion gives stratigraphic meaning to seismic phase and is used to interpret high frequency sequences; the technology of stratal slicing is a series of slices along the surfaces inserted proportionally between two time surfaces and this technology is used to study the planar distribution of depositional systems. Based on the fact that seismic data with different main frequency reflect different geological information, the interpretation result will be more reasonable in geological meaning by the technology of interpreting with frequency decomposing.

Key words seismic sedimentology, the time-crossing attribute of seismic event, 90° phasing of seismic data, stratal slicing, interpretation with frequency decomposing.

欢迎订阅《沉积学报》

《沉积学报》是中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会、中国地质学会沉积地质专业委员会、中国科学院兰州地质研究所共同主办的综合性学术刊物,是全国自然科学核心期刊。主要刊载沉积学、沉积矿产、地球化学以及相关分支学科、交叉学科的基础和应用基础研究的创新性研究成果和高水平论文,介绍沉积学研究的新技术、新理论及国内外最新沉积学论著,同时也报导有关学术活动、学科研究动态及学术思想的讨论和争鸣。优先发表国家、省、部级重大科技项目及基金资助的在沉积学、地球化学前沿各分支领域以及学科交叉点上有创造性的研究成果。读者对象为大专院校地学专业的师生及科研院所的地学工作者。

2006年起《沉积学报》改为双月刊,16开本,每期144页,逢双月10日出版,定价30元,全年定价180元。国内外公开发行,欢迎广大读者到当地邮局订阅。

国内邮发代号:54-45

国外发行代号:Q832

同时欢迎各位专家学者踊跃投稿。

地址:兰州市东岗西路382号 中国科学院兰州地质研究所《沉积学报》编辑部

邮政编码:730000

联系电话:(0931)4960916

传真:(0931)8278667

Email: cjxb@ns.lzb.ac.cn